

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАСОСНЫХ ШТАНГ

Н.А. Богатов, И.В. Лещев, А.А. Богатов
(г. Екатеринбург, Уральский федеральный университет)

В Поволжье, Башкирии, Татарстане, Пермском крае, Удмуртии в эксплуатации находятся более 65 тыс. скважин, из них 40 тыс. – со штанговыми глубинными насосами. Ежегодно 300 тыс. штанг выходят из строя и утилизируется в металлолом. Для удовлетворения задач потребителя требуется повышение долговечности насосных штанг в 2-3 раза по сравнению с существующими штангами, циклическая стойкость которых достигает 5 миллионов циклов.

В России насосные штанги выпускает Очерский машиностроительный завод групп прочности К, С, D, D спец, D супер из марок сталей 20Н2М, 15Х2НМФ, 38ХМ, 15НЗМА, 40Г2,

30ХМА, 15НЗМА, 15Х2ГМФ, 14Х3ГМЮ, 38ХГМ диаметром 15,88, 19,05, 22,23, 25,40, 28,58 мм и длиной 8,00 и 9,14 м. Заготовкой для насосных штанг являются горячекатаные прутки. Технология изготовления штанг включает в себя горячую прокатку прутков, порезку их на мерные длины, охлаждение проката на воздухе, нагрев концов заготовок, высадку головок штанг, охлаждение заготовок штанг с высаженными головками, а также термообработку. Требования нормативно-технической документации по ТУ 3665-007-002175515-98 и API Spec 11B представлены в табл.1, а механические свойства в табл.2.

Таблица 1

Требования нормативно-технической документации

Стандарт	ТУ 3665-007-002175515-98				
Типоразмер	ШН 5/8"	ШН 3/4"	ШН 7/8"	ШН 1"	ШН 1 1/8"
Диаметр, мм	15,88	19,05	22,23	25,40	28,58
Длина, мм	8000, 9140				
Укороченная длина	Любая от 500 мм по требованию Заказчика				
Подгоночные штоки, мм	менее 500 мм				
Стандарт	API Spec 11B				
Типоразмер	ШН 5/8"	ШН 3/4"	ШН 7/8"	ШН 1"	ШН 1 1/8"
Диаметр, мм	15,88	19,05	22,23	25,40	28,58
Номинальная длина, мм*	25(7620), 30(9144)				
Длина, мм	7518, 9042				
Укороченная длина**	Любая от 500 мм по требованию Заказчика				

Таблица 2

Механические свойства насосных штанг

Класс	Группа стали	Минимальный предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинения, % (не менее)	Ударная вязкость КСУ, МДж/м ²
К	Никель-молибденовая	414	620...793	10	0,78
С	Марганцовистая	414	620...793	13	-
D	Марганцовистая Хромомолибденовая	586	793...965	9	0,78
		586	793...965	12	0,88
D спец	Специальный никелесодержащий сплав	630	820...990	12	0,69
D супер	Хромомолибденовая углеродистая	720	930...1050	11	0,69

Ежегодно в ОАО «Татнефть» имеет место 250 случаев обрывов штанг, в ОАО «Лукойл» - 400 случаев. Ликвидация обрыва штанг связана с

большими затратами и потерями. Продление срока службы насосных штанг является одной из актуальных задач при добыче нефти.

В работе представлены результаты исследования способа термомеханической обработки штанг, отработавших эксплуатационный ресурс и списанных в металлолом. Новый способ основан на применении радиально-сдвиговой прокатки при температуре горячей обработки с последующим ускоренным охлаждением. Исследования реновации металла отработавших штанг из стали марки 20Н2М после ТМО позволили повысить уровень механических свойств:

$\sigma_B = 760$ МПа, $\sigma_{0,2} = 695$ МПа, $\delta_5 = 20$ %, $KCU^{+24} = 2,23$ МДж/м², $HB = 237$ ед.

Благодаря этому, уменьшена металлоемкость штанговой колонны в 1,34 раза. Штанги опытно-промышленной партии были использованы на двух промысловых колоннах в ОАО «Татнефть». После отработки 2-х миллионов циклов несколько опытных штанг были подвергнуты обследованию: уровень механических свойств на высаженных концах с резьбой и в средней части штанг, микроструктурные исследования, а также выявление зоны термического влияния на твердость в области перехода от головки к средней части штанги.

Опытные образцы были выточены из различных мест штанги:

- образцы насосных штанг концевой участка с муфтой (комплект 1);
- образцы насосных штанг средней части (комплект 2);
- образцы насосных штанг концевой участка с ниппельной стороны (комплект 3).

Твердость определяли на твердомере по Бринелю, прочностные и пластические характеристики - при растяжении пятикратных образцов диаметром 10 мм на разрывной машине, ударную вязкость KCU при температуре 297 °К оценивали с помощью маятникового копра на образцах сечением 10x10 мм с U-образным надрезом.

Опытные данные исследования механических свойств восстановленных термомеханической обработкой насосных штанг были подвергнуты статистической обработке. Рассчитаны выборочные средние и дисперсии, выполнены проверки статистических гипотез для сравнения дисперсий и средних по критериям Фишера и Стьюдента. Точечные оценки временного сопротивления, условного предела текучести, относительного удлинения, ударной вязкости и твердости по Бринелю для каждого комплекта образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Точечные оценки полученных результатов по механическим свойствам

Точечные оценки	№ комплекта	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCU^{+24} МДж/м ²	Твердость по Бринелю HB, ед.
Выборочное среднее арифметическое, \bar{x}	1	763,5	698,5	19,9	2,23	239,85
	2	766,67	703,33	19,37	2,207	238,17
	3	751	670,3	20,7	2,253	235,5
Выборочная дисперсия, s^2	1	0,5	264,5	0,08	0,0084	3,367
	2	0,33	104,33	0,213	0,00143	26,567
	3	9	270,33	0,84	0,021	4,7
Среднеквадратическое отклонение, s	1	0,707	16,26	0,283	0,0917	1,835
	2	0,574	10,21	0,462	0,0378	5,154
	3	3	16,44	0,917	0,145	2,168

Результаты сравнения выборочных дисперсий механических свойств комплектов 1 и 2 ,

а также 2 и 3 приведены в табл. 4 и 5 соответственно.

Таблица 4

Таблица сравнения дисперсий мехсвойств образцов штанг комплекта 1 и 2

№ комплекта	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_5 , %			KCU^{+24} , МДж/м ²			Твердость по Бринелю, ед.		
	s^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	s^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	s^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	s^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	s^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$
1	0,5	1,51	18,5	264,5	2,54	18,5	0,08	0,38	18,5	0,0084	5,87	19,0	3,367	0,127	5,05
2	0,33			104,33			0,213			0,00143			26,567		

Таблица 5

Таблица сравнения дисперсий мехсвойств образцов штанг комплекта 2 и 3

№ комплекта	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_5 , %			КСУ ⁺²⁴ , МДж/м ²			Твердость по Бринеллю, ед.		
	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$	S^2	F	$F_{v_A, v_B, \alpha}$
2	0,33	0,037	19,0	104,33	0,386	19,0	0,213	0,254	19,0	0,00143	0,068	19,0	26,567	5,65	5,05
3	9			270,33			0,84			0,021			4,7		

Как видно из табл.4 и 5 неравенство $F \leq F_{v_A, v_B, \alpha}$ (F – вычисленное значение статистики, $F_{v_A, v_B, \alpha}$ – квантиль распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$) для каждой характеристики мехсвойства выполняется, следовательно подтверждается нулевая гипотеза о равенстве дисперсий механических свойств образцов штанг комплекта 1 и 2, а также 2 и 3. Отметим, что для показателя твердости образцов

штанг комплекта 2 и 3 это неравенство не выполняется, следовательно применяем альтернативную гипотезу о том, что выборочная дисперсия твердости по Бринеллю для образцов штанг комплекта 2 больше выборочной дисперсии твердости образцов штанг комплекта 3.

Сравнение выборочных средних арифметических механических свойств штанг комплектов 1 и 2, а также 2 и 3 приведены в табл. 6 и 7 соответственно.

Таблица 6

Таблица сравнения выборочных средних арифметических мехсвойств образцов штанг комплекта 1 и 2

№ комплекта	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_5 , %			КСУ ⁺²⁴ , МДж/м ²			Твердость по Бринеллю, ед.		
	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$
1	763,5	5,283	12,706	698,5	0,374	12,706	19,9	1,591	12,706	2,23	0,402	4,303	239,85	0,752	2,571
2	766,67			703,33			19,37			2,207			238,17		

Таблица 7

Таблица сравнения средних арифметических мехсвойств образцов штанг комплекта 1 и 2

№ комплекта	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_5 , %			КСУ ⁺²⁴ , МДж/м ²			Твердость по Бринеллю НВ, ед.		
	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$	\bar{x}	$ t $	$t_{\alpha, v}$
2	767,67	9,453	4,303	703,33	2,956	4,303	19,37	2,245	4,303	2,207	0,532	4,303	238,17	1,170	2,571
3	751			670,3			20,7			2,253			235,5		

Как видно из табл.6 и 7 неравенство $|t| \leq t_{\alpha, \nu}$ (t – вычисленное значение статистики, $t_{\alpha, \nu}$ – квантиль распределения Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$) для каждого мехсвойства выполняется, следовательно подтверждается нулевая гипотеза о равенстве средних арифметических мехсвойств образцов штанг комплекта 1 и 2, а также для каждой характеристики мехсвойства для комплекта 2 и 3, за исключением временного сопротивления. Для временного сопротивления образцов штанг комплекта 2 и 3 принимается альтернативная гипотеза о том, что среднее арифметическое временного сопротивления образцов штанг комплектов 2 больше чем среднее арифметическое временного сопротивления образцов штанг комплекта 3. Это означает, что статистически значимыми показателями (с вероятностью 95%) являются средние арифметические временного сопротивления образцов штанг комплекта 2 по сравнению с аналогичными показателями свойств образцов штанг комплекта 3.

Итак, проведенный статистический анализ механических свойств показал:

- значения предела текучести, относительного удлинения и ударной вязкости образцов насосных штанг по всей длине штанги являются статистически равными;
- значения временного сопротивления и твердости образцов насосных штанг, взятых из средней части и конца с муфтой, также являются статистически равными;
- значения временного сопротивления и твердости образцов насосных штанг, взятых от нипельного конца отличаются от соответствующих свойств образцов из средней части, однако проведенный анализ (отклонения временного сопротивления и твердости от средних значений не превышает 4%).

При исследовании микроструктуры образцов насосных штанг были определены размер перлитных колоний, соотношение фаз перлита и избыточного феррита, найдена оценка среднего размера ферритной прослойки по границам аустенитного зерна в зависимости от его размеров, найдена оценки дисперсности перлита. Показано, что в процессе эксплуатации восстановленных штанг изменения микроструктуры, полученной в результате ТМО, не произошло.

Заключение

В результате выполненного исследования инновационной технологии восстановления отработанных нефтяных штанг способом термомеханической обработки удастся повысить уровень механических свойств стали марки 20Н2М, что позволило уменьшить металлоемкость штанговой колонны в 1,34 раза. Технология обеспечивает однородность механических свойств как по длине штанги, так и на высаженных концах с резьбой. Зона термовлияния в области перехода от головки с резьбой к телу штанги не выявлена. Эти результаты дают основание предполагать, что штанги после реновации металла в процессе ТМО, могут отработать второй срок. Исследования механических свойств и микроструктуры металла восстановленных штанг после 2-х миллионов циклов подтверждают этот вывод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обработка одномерных опытных данных: методические указания к выполнению домашнего задания по курсам «Экспериментальная механика» и «Организация эксперимента» / А.М. Михайленко. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 64 с.
2. Стандарт API Spec 11B — технические характеристики для насосно-компрессорных штанг (Specification for Sucker Rods).
3. Стандарт ТУ 3665-007-002175515-98 – технические условия для насосно-компрессорных штанг.