



УДК 25.00.17

## ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШТАНГ ГЛУБИННОНАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

### THE STUDY OF PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF SUCKER RODS OF DOWNHOLE EQUIPMENT DURING THEIR MANUFACTURING

**Дементьев Вячеслав Борисович**

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт механики ФГБУН  
Удмуртский федеральный  
исследовательский центр УрО РАН

**Иванова Татьяна Николаевна**

доктор технических наук, доцент,  
Удмуртский государственный университет  
tatnic2013@yandex.ru

**Коршунов Александр Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
Институт механики ФГБУН  
Удмуртский федеральный  
исследовательский центр УрО РАН

**Аннотация.** В работе предложена новая технология изготовления штанг из низкоуглеродистых сталей. В результате теоретических исследований и опытно-промышленных испытаний получены штанги с высокими механическими свойствами, соответствующими классам К, D ГОСТ 13877-80, группе В ГОСТ 14955-77 и международному стандарту API Spec 11 В. Рекомендованы к производству по предлагаемой технологии штанги ШН19, ШН22, ШН25 длиной от 1000 до 9140 мм с механическими свойствами  $\sigma_{0,2min}$  586 МПа,  $\sigma_B$  790–960 МПа и работой их в коррозионно-активной среде.

Механические свойства металлов зависят и от прочности межатомной связи, и от строения кристаллической решетки, величины зерна, количества, формы и распределения фаз в сплаве. В работе проведены исследования роста зерен материала трубы из-за продолжительного нагрева, выявлен эффект общего измельчения (фрагментации) структуры и дисперсионное упрочнение, рекомендованы режимы изготовления. Получены зависимости деформации, влияющие на величину зерен металла от пределов текучести, прочности, пластичности и температуры электроотпуска. Установлено, что с увеличением степени деформации происходит повышение пределов текучести и прочности, и уменьшение пластичности. Уменьшение температуры электроотпуска приводит к снижению предела текучести стали, что облегчает сдвиговые процессы в зернах металла. Это позволяет регулировать режимы электроотпуска и варьировать характеристики пластичности, прочности и получить оптимальные механические свойства штанг для увеличения надежности глубиннонасосного оборудования.

**Dementiev Vyacheslav Borisovich**

Doctor of Engineering,  
Senior Research Associate,  
Institute of Mechanics, the Ural Branch of the  
Russian Academy of Sciences

**Ivanova Tatyana Nikolaevna**

Doctor of Engineering, Associate Professor,  
Udmurt state university  
tatnic2013@yandex.ru

**Korshunov Alexander Ivanovich**

Doctor of Engineering, Professor,  
Institute of Mechanics, the Ural Branch of the  
Russian Academy of Sciences

**Annotation.** New technology of sucker rod manufacturing from low-carbon steels is proposed in this work. As a result of theoretical research and pilot testing, sucker rods obtained have high mechanical properties that correspond to K, D classes of GOST 13877-80 as well as group B of GOST 14955-77. In addition, they comply with international standard APISpec 11 B. This technology is recommended to be used while producing sucker rods ШН19, ШН22, ШН25, which length is 1000-9140 millimeters, their mechanical properties being  $\sigma_{0,2min}$  586 MPa,  $\sigma_B$  790–960 MPa. Moreover, this technology is advised for sucker rods operating in corrosive conditions. Mechanical properties of metals depend on strength of interatomic bond, lattice structure, grain size, quantity, shape and distribution of phases in alloy. Research on grain growth of pipe material under continuous heating was carried out in this work. Effect of overall grinding (fragmentation) of structure and dispersion hardening was observed, modes of manufacturing were recommended. Dependences of deformation that influence grain size according to yield stress, durability, plasticity and temperature of electric tempering. It was determined that by increasing deformation degree, yield stresses and durability grow, plasticity decreases. Drop in temperature of electric tempering leads to decrease in yield stress, that simplifies shear processes in metal grains. It allows electric tempering modes to be regulated. At the same time, it gives an opportunity to change plasticity and durability characteristics as well as provide optimum mechanical properties for sucker rods in order to increase reliability of downhole equipment.



**Ключевые слова:** насосная штанга, технология изготовления, прочность, надежность, горизонтально-ковочная машина, электроотпуск.

**Keywords:** sucker rod, tubing string, manufacturing technology, durability, reliability, horizontal forging machine.

**А**нализируя технические решения и технологии повышения работоспособности глубиннонасосного оборудования, было выявлено, что одним из резервов повышения износостойкости, прочности и надежности глубинных штанговых насосов и насосно-компрессорных труб является технология их изготовления [1–5].

Типовая технология изготовления насосных штанг из низкоуглеродистых сталей 20Н2М, 15Х2ГМФ, 20ХГНМ и др. включает: штамповку головок на горизонтально-ковочных машинах ГКМ, нормализацию штанги и последующую механическую обработку головок, которые соответствуют геометрическим размерам и прочностным свойствам ГОСТ 13877-80. Данная технология не обеспечивает высокий уровень прочностных свойств, что ведет к частным обрывам и заменам штанг.

Известен также способ, включающий: штамповку головок на ГКМ, нормализацию штанги, механическую обработку головок, поверхностную закалку токами высокой частоты ТВЧ или объемную закалку с последующим высоким отпуском, обеспечивающий повышенные прочностные свойства (классы К, D) соответствующие ГОСТ 13877-80. Данный способ усложняет технологию за счет применения специальных печей для нагрева под закалку и отпуск длинных штанг, более трудоемкий и кроме того требует больших площадей, обслуживающего персонала и увеличивает расходы электроэнергии и другие методы, обеспечивающие повышение характеристик [5].

Для повышения характеристик прочности, пластичности низкоуглеродистых сталей и снижении трудоемкости изготовления и ремонта штанг предлагается: штамповка головок на ГКМ, электроотпуск при температуре 480–500 °С, правка – растяжением с усилием (0,3 ... 0,5)  $\sigma_{0,2}$ , упрочнение штанги на участке 300–500 мм от головки путем обкатки профильными роликами, обеспечивающие контактные напряжения (0,7 ... 0,8)  $\sigma_{0,2}$  при осевой подаче 8–9 м/мм за счет разворота обкатывающих роликов. Для этого после высадки головок на ГКМ штангу подвергают электроотпуску при температуре 480–500 °С с выдержкой 15–20 мин для придания материалу штанги равнопрочного состояния по всей длине. Затем проводят правку – растяжением при температуре 180–200 °С с усилием (0,3 ... 0,5)  $\sigma_{0,2}$ . При этом закрепление штанги происходит за квадратную часть головки, что позволяет выдержать прямолинейность тела штанги относительно головок. Затем проводится упрочнение галтели с прилегающим участком штанги 300–500 мм, т.е. переходной зоны термического влияния, возникающей при штамповке головок. Упрочнение осуществляется вращающейся головкой с тангенциальным перемещением роликов по радиусу галтели. Усилие обкатки (0,7 ... 0,8)  $\sigma_{0,2}$  обеспечивается скоростью вращения головки, а разворот обкатывающих роликов относительно оси тела штанги обеспечивает продольную подачу штанги 8–9 м/мин [6].

В результате наших опытно-промышленных испытаний проведение технологических операций в данной последовательности и с режимами обработки по предлагаемому способу позволяет получить штанги из низкоуглеродистых сталей с высокими механическими свойствами, соответствующими классу D, и дает возможность их использовать в коррозионно-активной среде. Термическая обработка 480–500 °С проводится для релаксации остаточных напряжений, стабилизации структуры и механических свойств металла штанги. Данная температура выбрана из условия температуры отпуска для низкоуглеродистых сталей, поставляемых в нормализованном или улучшенном состоянии. Используя электроскоростной нагрев можно снизить температуру отпуска на 100–150 °С. Установлено, что при более низкой температуре (ниже 480–500 °С) происходит снижение предела прочности и предела пластичности металла. Так как в низкоуглеродистых сталях содержится небольшое количество легирующих элементов (никеля, хрома, марганца, молибдена), то обеспечивается высокая прокаливаемость штанги и не требуется высоких скоростей охлаждения, достаточно охлаждения штанг на воздухе. Время выдержки при электроотпуске установлено экспериментально равным 15–20 мин., что является достаточным при релаксации напряжений и стабилизации структуры и механических свойств металла. При выдержке менее 15 мин. структура металла штанги остается неоднородной, что ведет к дополнительному искривлению тела штанги. Выдержка более 20 мин. нецелесообразна, потому что дальнейшее улучшение по геометрическим характеристикам и по структуре ферритно-перлитной смеси не наблюдается. Твердость при этом соответствует 277–286 НВ.

Подстуживание штанги до 180–200 °С после отпуска перед правкой – растяжением необходимо по причине перехода зоны хрупкости при средних температурах 250–400 °С и возможности проведения правки – растяжения не нарушая сплошности металла. Правка выше 200 °С может привести к разрушению при пороге хрупкости при среднем отпуске, а правка ниже 180 °С нежелательная из-за образования микротрещин на поверхности тела штанги, что в дальнейшем послужит концентратором напряжений. Поэтому по стандарту API правка в холодном состоянии не допускается. Правка штанг проводится при усиллии (0,3 ... 0,5)  $\sigma_{0,2}$  с выдержкой 50–70 с., что обеспечивает геометрические характеристики штанги в со-



ответствии с группой В ГОСТ 14955-77: параметр шероховатости Ra 1,1–1,8 мкм, дефекты поверхностные 0,012–0,02 мкм. При усиллии правки – растяжением менее  $0,3 \sigma_{0,2}$  и выдержкой менее 50 с. Штанга не выправляется полностью и остается кривизна более 5 мм в концевой части штанги на участке 0,5 метра от головки. При усиллии более  $0,5 \sigma_{0,2}$  и времени выдержки более 70 с. штанга выправляется и соответствует стандарту, но значительно увеличивает цикл обработки. Следует также отметить, что время выдержки 50–70 с. в напряженном состоянии позволяет дополнительно упрочнить металл равномерно по всей длине, и получить механические свойства  $\sigma_{0,2} = 730 \dots 820$  МПа,  $\sigma_b = 850 \dots 960$  МПа, что соответствует классу D согласно стандартам API Spec 11 B [7].

Поверхностное упрочнение галтели и подэлеваторного участка штанги с участком длиной 300–500 мм проводится путем откатки профильными роликами с усилием  $(0,7 \dots 0,8) \sigma_{0,2}$  со скоростью 8–9 м/мин. Данная операция поверхностного упрочнения проводится с целью дополнительного упрочнения участка штанги, подверженного зоне температурного влияния при штамповке головок, где температура достигает 1100 °С. Поэтому создание сжимающих остаточных напряжений на поверхности данного участка и упрочнение поверхностных слоев металла позволяют повысить прочностные свойства данного участка и циклическую долговечность всей штанги. Обкатка участка штанги с усилием менее  $0,7 \sigma_{0,2}$  не обеспечивает упрочнение и создает остаточные напряжения сжатия менее 120 МПа, оставляя при этом шероховатость поверхности более 5 мкм, что будет снижать прочностные характеристики штанги из-за дефектов поверхностного слоя. При усиллии обкатки более  $0,8 \sigma_{0,2}$  происходит наклеп поверхностного слоя на участках перекрытия следов обкатки и возникает волнистость поверхности в виде винтового следа, что ведет к микротрещинам поверхности и служит концентратором при работе, особенно в коррозионно-активных средах.

Теоретические исследования были проверены экспериментально [3, 8]. В качестве исходной заготовки используется горячекалиброванная сталь марки 20ХГН1М. Заготовка закладывается в щелевую газовую печь на длину 400 мм и нагревается до температурыковки материала. После нагрева, по одной штуке, заготовки подвергаются ковке на ГКМ, где формируется головка штанги за 5 переходов. После высадки головок, штанги подаются на установку электроотпуска, где каждая заготовка закладывается на электроконтакты и нагревается до температуры 480–500 °С с выдержкой 15–20 мин. При этом разброс температур по длине штанги не превышает  $\pm 5$  °С. С установки электроотпуска штанги подаются на охлаждение до температуры 180–200 °С за время 15–18 мин. Штангу, нагретую до температуры 180–200 °С, помещают в машину растяжения, закрепляя в захваты за квадратную часть головки, и подвергают растяжению с усилием  $(0,3 \dots 0,5) \sigma_{0,2}$ , контролируемому по давлению на штоке гидроцилиндра:  $(10,8–11,9) T$  для штанги диаметром 19,2 мм, при этом напряжения растяжения составляет 380–410 МПа, а для штанги диаметром 22,4 мм  $(15,3–16,1) T$ , соответственно, при этих же значениях напряжения. Далее штанга подается на установку поверхностно-пластической деформации, где в автоматическом режиме обкатывается вращающейся головкой с неприводными роликами цилиндрического профиля 2 мм переходящим в радиус 20 мм и повернутыми на угол 3° по отношению к оси штанги, обеспечивающие подачу штанги 8–9 м/мин при скорости вращения 180 об/мин и усилием сжатия за счет радиального перемещения от центробежных сил, равного 500–530 МПа на контактных поверхностях. Готовые штанги подвергались контролю по геометрическим характеристикам, по дефектам поверхности: твердость соответствовала 260–270 НВ, структура однородная – ферритно-перлитная, механические свойства – предел текучести  $\sigma_{0,2}$  780–820 МПа, предел прочности  $\sigma_b$  860–930 МПа, относительное удлинение  $\delta$  15–16 %, относительное сужение  $\psi$  59–63 % при требованиях стандарта API для класса D  $\sigma_{0,2}$  690 МПа,  $\sigma_b$  790–965 МПа,  $\delta$  12 %,  $\psi$  55 %. Также были проведены испытания на многоцикловую прочность по ГОСТ 25.502-79. Схема нагружения соответствовала поперечному изгибу при вращении, симметричный цикл. База испытаний 107 циклов. При нагрузке 3,0 кгс с числом циклов 1240000 штанга не разрушилась, при нагрузке 2,7 кгс 108 циклов – разрушений не наблюдается.

Основным элементом, оказывающим влияние на свойства углеродистых и низкоуглеродистых сталей, является углерод. Введение легирующих элементов в состав сталей позволяет значительно изменять их свойства. С увеличением содержания легирующих элементов даже в небольших количествах истинное сопротивление деформации стали возрастает. Причем наибольшее влияние оказывает кремний, в меньшей степени – никель и марганец, хром. При более высоком содержании легирующих элементов их влияние усложняется.

Механические свойства металлов являются структурно-чувствительными, т.е. зависят не только от прочности межатомной связи, но и от строения кристаллической решетки, величины зерна, количества, формы и распределения фаз в сплаве.

От размера зерна зависит предел прочности металла – величина, близкая к пределу текучести. В результате анализа экспериментальных данных получены зависимости свойств малоуглеродистой стали штанг от размера зерна, зависимости пределов прочности и текучести от температуры электроотпуска (табл. 1).



**Таблица 1** – Влияние размера зерна на свойства стали штанг

Размер зерна (число зерен на 1 мм <sup>2</sup> )	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Температура электроотпуска, °С	Удлинение образца на длине 7620 мм, %	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа
1	757	480	15	726
6	836	497	15	750
15	860	485	15	728
51	870	500	16	740
76	890	482	15	726
120	920	492	15	739

Установлено, что с увеличением степени деформации происходит повышение пределов текучести и прочности, и уменьшение пластичности. В результате анализа исследований были получены эмпирические зависимости:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{T.O} + \frac{\pi}{4} a' \sqrt{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{T.O}$  – исходный предел текучести материала;  $\varepsilon$  – деформация;  $a' = 60 \dots 75$  МПа – коэффициент, зависящий от марки стали. Чем больше углерода в стали, тем больше коэффициент.

Средний предел текучести в очаге поверхностно-пластической деформации составит

$$\sigma_{0,2cp} = \sigma_{T.O} + \frac{a'}{2} \left( \sqrt{\varepsilon} + \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}} \arcsin \sqrt{\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon}} \right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – предварительное обжатие, %.

Замечено, что с повышением температуры электроотпуска предел текучести уменьшается по экспоненциальной кривой, что облегчает сдвиговые процессы в зернах металла [10]. Величина  $\sigma_{0,2}$  снижается с повышением температуры (табл. 1). Это позволило выявить зависимость:

$$\sigma_{0,2}^t = \sigma_{0,2} \left( 1 - \frac{n_x \sqrt{t^\circ}}{100} \right), \quad (3)$$

где  $\sigma_{0,2}^t$  – предел текучести с учетом температурного фактора;  $n_x$  – коэффициент, зависящий от химического состава марки стали;  $t^\circ$  – температура нагрева металла.

Сопrotивление деформированию возрастает при повышении скорости деформации в штангах глубиннонасосного оборудования. Это объясняется двумя конкурирующими скоростями процессов, происходящих в металле: упругой и пластической деформации, упрочнения и разупрочнения металла. Упругая деформация распространяется в твердой среде со скоростью звука; скорость распространения пластической деформации значительно меньше скорости распространения упругой деформации. Следовательно, при нагружении штанги выше предела упругости стали величина пластической деформации должна определяться скоростью этого нагружения, чем выше скорость нагружения, тем меньше времени для протекания пластической деформации и тем выше напряжение, при котором возникает переход из упругой деформации в пластическую. В зависимости от продолжительности пластического деформирования возникающее упрочнение в той или иной степени снимается разупрочнением. В результате, быстрому процессу деформации соответствует большее сопротивление деформации, чем, соответственно, медленному процессу, т.е. напряжение тем больше, чем выше скорость деформации. Скорость перемещения дислокаций, определяющая скорость деформирования, также имеет предел, который зависит от величины нагрузки и температуры. Высокая степень деформации до 67 % приводит к завышенным усилиям деформации и повышенным нагрузочным способностям работы штампового инструмента и оснастки ГКМ.

На данные штанги получен сертификат соответствия № РОСС РИ АЯ04В12655. Штанги прошли эксплуатационные испытания, где после 712 дней работы обрывов и отворотов не наблюдалось.

В результате теоретических и опытно-промышленных испытаний рекомендованы к производству по данной технологии изготовление штанг ШН19, ШН22, ШН25 длиной от 1000 до 3680 мм, 7620 мм, 8000 мм, 9140 мм с механическими свойствами  $\sigma_{0,2min}$  586 МПа,  $\sigma_b$  790 – 960 МПа.



Применение данной технологии изготовления насосных штанг позволяет повысить межремонтный период работы скважины, увеличить характеристики пластичности, прочности и надежности глубиннонасосного оборудования.

#### Литература:

1. Климов В.А., Валовский В.М. Об эффективности эксплуатации насосных штанг // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 94–97.
2. Счастливцева В.М., Табатчикова Т.И., Яковлева И.Л. и др. Влияние термомеханической обработки на сопротивление хрупкому разрушению низкоуглеродистой низколегированной стали // Физика металлов и металлургия. – 2015. – Т. 116. – № 2. – С. 189–199.
3. Dementyev V.B., Makarov S.S., Makarova E.V. Mathematical Modeling of Cooling High-Temperature Cylindrical Workpieces // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 393–399.
4. Газаров А.Г., Эпштейн А.Р., Андреев В.Е. К вопросу усталостно-коррозионного износа глубиннонасосного оборудования // Методы увеличения нефтеотдачи трудноизвлекаемых запасов. Проблемы и решения. – Уфа : Изд-во «Монография», 2003. – Вып. 4. – С. 222–223.
5. SU992601A C21D9/08, 30.01.83.
6. Пат. № 2270871 РФ. Заявка № 2005100827 от 17.01.2005., Способ изготовления нефтенасосных штанг / Дементьев В.Б., Иванов А.Г., Абдулин Н.Н. – зарегистрировано 27.02.2006.
7. API Spec 11B Specification for Sucker Rods, Polished Rods and Liners, Couplings, Sinkers Bars, Polished Rod Clamps, Stuffing Boxes, and Pumping Tees (With Errata 1, October 2010, Errata 2, February 2011).
8. Dementyev V.B., Suhikh A.A., Makhneva T.M. On problem of increasing the structural strength of maraging steels // Inorganic Materials; Applied Research. – 2015. – Т. 6. – № 4. – P. 343–349.

#### References:

1. Klimov V. A., Valovsky V.M. About efficiency of operation of pump bars // Oil economy. – 2015. – No. 1. – P. 94–97.
2. Schastlvtseva V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., etc. Influence of thermomechanical processing on resistance to fragile destruction of the low-carbon low-alloyed steel // Physics of metals and metallurgical science. – 2015. – Т. 116. – No. 2. – P. 189–199.
3. Dementyev V.B., Makarov S.S., Makarova E.V. Mathematical Modeling of Cooling High-Temperature Cylindrical Workpieces // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 393–399.
4. Gazarov A.G., Epstein A.R., Andreyev V.E. To a question of fatigue and corrosion wear of the deep and pump equipment // Methods of increase in oil recovery of hardly removable stocks. Problems and decisions. – Ufa : Monografiya publishing house, 2003. – Issue 4. – P. 222–223.
5. SU992601A C21D9/08, 30.01.83.
6. Stalemate. No. 2270871 of the Russian Federation. Application No. 2005100827 from 1/17/2005., the Way of production of petropump bars / Dementiev V.B., Ivanov A.G., Abdulin N.N. – it is registered 2/27/2006.
7. API Spec 11B Specification for Sucker Rods, Polished Rods and Liners, Couplings, Sinkers Bars, Polished Rod Clamps, Stuffing Boxes, and Pumping Tees (With Errata 1, October 2010, Errata 2, February 2011).
8. Dementyev V.B., Suhikh A.A., Makhneva T.M. On problem of increasing the structural strength of maraging steels // Inorganic Materials; Applied Research. – 2015. – Т. 6. – № 4. – P. 343–349.