

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.05

УДК 62

С.Н. Мольцен¹, А.В. Кравченко¹, Ю.Н. Симонов¹, Р.М. Полежаев²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²ЭЛКАМ-нефтемаш, Пермь, Россия

ГАРАНТИЯ КАЧЕСТВА ЧЕРЕЗ КОНТРОЛЬ
КРИТИЧЕСКИХ ДЕВИАЦИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Исследованы проблемы качества, возникающие при освоении современных передовых видов насосов API, пока еще редко встречающихся на территории Российской Федерации. Рассмотрены типичные отказы таких изделий, отмечены конструктивные и эксплуатационные отличия от обычных насосов. Проведены обзор усталостных разрушений резьбовых соединений и поиск эффективных методов управления и контроля микроструктуры для гарантии качества. Реализован классический порядок определения причин отказов, включая экспертизу качества штоков, металлографическое исследование типичного для нефтяной отрасли изделия, фрактографию разрушения.

Сделаны предположения относительно схожести разрушений, полученных в разных эксплуатационных условиях, показаны общие закономерности. Для разъяснения системности разрушений выполнены аналитические расчеты по модифицированной формуле Инглиса. Таблично представлены нелинейные распределения напряжений под профилем конической резьбы API. Подробно рассмотрена существенная концентрация напряжений под впадиной резьбы, достигающая пятикратных номинальных напряжений по телу детали за резьбой. Обоснованы причины и конструктивные факторы повышенных напряжений.

Сделаны выводы о критичности девиаций микроструктуры проката одного завода-изготовителя. Показана корреляция типов микроструктуры и наработки изделия на отказ. Пояснена приемлемость различных микроструктур вдали от концентраторов напряжений и критичность во впадинах резьбы. Сделан вывод о необходимости управления и контроля за критическими девиациями микроструктуры в районе концентраторов напряжения для гарантии качества.

Проведены обзор и оценка подходов по обеспечению гарантии качества деталей насосов API. Выделены особенно эффективные меры, показана возможность комбинирования методов упрочнения. Объяснена недостаточность классических методов металлургии для решения проблемы повышения качества объектов исследования.

Ключевые слова: разрушение резьбы, надежность, долговечность, штанговый насос, трещиностойкость, расчет на усталость, конечно-элементный анализ, улучшение качества, ТВЧ, обкатка резьбы роликами, API.

S.N. Moltsen¹, A.V. Kravchenko¹, Y.N. Simonov¹, R.M. Polezhayev²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²ELKAM-neftemash, Perm, Russian Federation

QUALITY ASSURANCE BY MICROSTRUCTURE DEVIATION CONTROL

The problem of the reliability at the promotion of modern advanced types of API pumps was investigated. Pumps that are still rare in the Russian Federation. The difference of the design and pumps use is presented and the typical failures of new model sucker rod pumps are discussed. The review of fatigue fractures of threaded connections is carried out for the search of effective methods for microstructure control and quality assurance. The classical procedure for determining failures has been shown, including examination of the quality of the rod, metallographic examination of bars typical for the oil industry and fractography.

Based on review of pumps had different operating conditions noted the similarity of destruction and are fixed regularities. To explain the systematic nature of the failure is performed a calculation by the modified Inglis formula. At paper is tabularly presented nonlinear stress distributions at microvolumes under the API tapered thread profile. The most significant stresses under the thread roots are considered in detail and here is shown in five times higher stresses in respect to the body of the rod behind the thread. The reasons and constructive factors are counted.

The main conclusions are made about the criticality of deviations of the objects microstructure, despite the same origin of the studied metal objects from one manufacturer, JSC "Omutninsky Metallurgical Plant". The correlation of the types of microstructure and the run life time between failures is shown. Clarified the acceptability of various microstructures away from stress concentrators and criticality in the root of the thread. It is concluded that it is necessary to control the critical deviations of the microstructure in the area of stress concentrators to ensure quality.

A review and assessment of approaches for quality assurance of threads API pump parts is carried out. Highlighted especially effective improvements, discussed the possibility of their combination. The insufficiency of the classical methods of metallurgy for solving the quality improving problem of the investigated objects is explained.

Keywords: thread failure, reliability, durability, sucker rod pump, toughness, fatigue calculation, finite element analysis, quality improvement, HFC, thread rolling, API.

Введение

Около 100 лет ведется добыча нефти с применением глубинных насосов. За это время было изобретено, освоено и стандартизировано множество разновидностей таких насосов, имеющих те или иные отличия в зависимости от назначения. Среди них наиболее популярны и практичны вставные штанговые глубинные насосы (ШГН), так как их легче и быстрее всего монтировать и демонтировать, когда это необходимо. Они могут быть установлены в любую подходящую по размеру насосно-компрессорную трубу без ее подъема на поверхность земли.

Вставные ШГН делятся на две большие группы по конструкции: с толстостенным цилиндром и с тонкостенным. Чем меньше толщина стенки, тем больше насос имеет объем камеры и, следовательно, большую подачу (дебит). Дизайн насосов устанавливается как отечественными, так и зарубежными стандартами¹.

Редкие и практически неизвестные нефтяникам России тонкостенные ШГН моделей ХWXX-200-XX-X или ХWXX-250-XX-X (где X имеет вариации, рис. 1) позволяют при прежней компоновке скважин (с той же насосно-компрессорной трубой, что и для меньшего толстостенного насоса) без каких-либо дополнительных капитальных вложений повышать добычу нефти практически на 25 %. Выигрывая в подаче, эти модели проигрывают в прочности, ведь толщины некоторых элементов тонкостенных ШГН приходится уменьшать практически в 2 раза в угоду увеличению камеры нагнетания. При этом некоторые элементы тонкостенных насосов испытывают повышенные эксплуатационные нагрузки.

К деталям ШГН тонкостенных насосов, повышено нагружаемых при эксплуатации, относятся штоки насосные (см. рис. 1). Безотказно работающие на младших по нагрузке моделях ХНХХ-175-XX-X-X-X², эти же штоки (поставщик, материал, геометрические параметры) периодически не дорабатываются гарантируемый изготовителем срок наработки в тонкостенных насосах.

В частности, в 2016 г. дизайн штоков насосных был изменен в сторону упрочнения и применена сталь 40X в термообработанном состоянии,

что привело к отсутствию отказов штоков в период с 2016 по 2018 г.

Однако же с началом массовых поставок новых для нефтяников СНГ моделей тонкостенных насосов случаи отказов участились, в 2019 г. составив не менее 6³. Важно отметить, что подавляющее большинство наблюдаемых случаев разрушения штоков насосных происходит по резьбе API line pipe (LP) mod ½"-14. Плоскость разрушения практически совпадает с основной плоскостью конической присоединительной резьбы (рис. 2).

Таким образом, компании необходимо повысить надежность и долговечность штоков насосных, обеспечивающих стабильную гарантированную наработку, в том числе в умеренно агрессивной среде. Поскольку лучшие решения могут быть основаны только на фактах, необходимо точно диагностировать разрушение и выявить истинные причины наблюдаемых разрушений деталей.

Определение причин разрушения

В фокус исследования взяты три случая разрушения штоков при эксплуатации. Данные приведены ниже (табл. 1).

Анализ приведенных данных показал, что штоки работали в ШГН одной и той же модели и разрушились по резьбовой части (см. рис. 2). Нарботка составила 101, 145 и 328 сут соответственно, а рабочие нагрузки, глубина спуска и число качаний – близкие. Важно отметить, что заготовки штоков усл. № 1 и № 2 изготовлены одним и тем же заводом-изготовителем, но относятся к разным партиям.

Всюду сжимающей нагрузкой в циклах качания можно пренебречь. Таким образом, коэффициент асимметрии цикла $R = 0$ [1]. Средняя нагрузка равняется половине нагрузки, указанной в вышестоящей строчке, с учетом практически $R = 0$. Следует также отметить корреляцию более высоких механических свойств образца усл. № 3 с большей наработкой до разрушения.

Достаточно длительный период эксплуатации и разрушение по резьбовой части могут свидетельствовать об усталостной природе данного разрушения.

Результаты общего фрактографического анализа

Поверхности разрушения трех представленных на исследование фрагментов штоков насосных показаны на рис. 3.

¹ API 11AX^{13ed}. Спецификация ШГН, сборочных узлов, компонентов и фиттингов.

ГОСТ 31835–2012. Насосы скважинные штанговые. Общие технические требования.

² API 11AX^{13ed}. Спецификация ШГН, сборочных узлов, компонентов и фиттингов.

³ Анализ СМК со стороны руководства АО «ЭЛКАМ-нефтемаш» 2019 г.

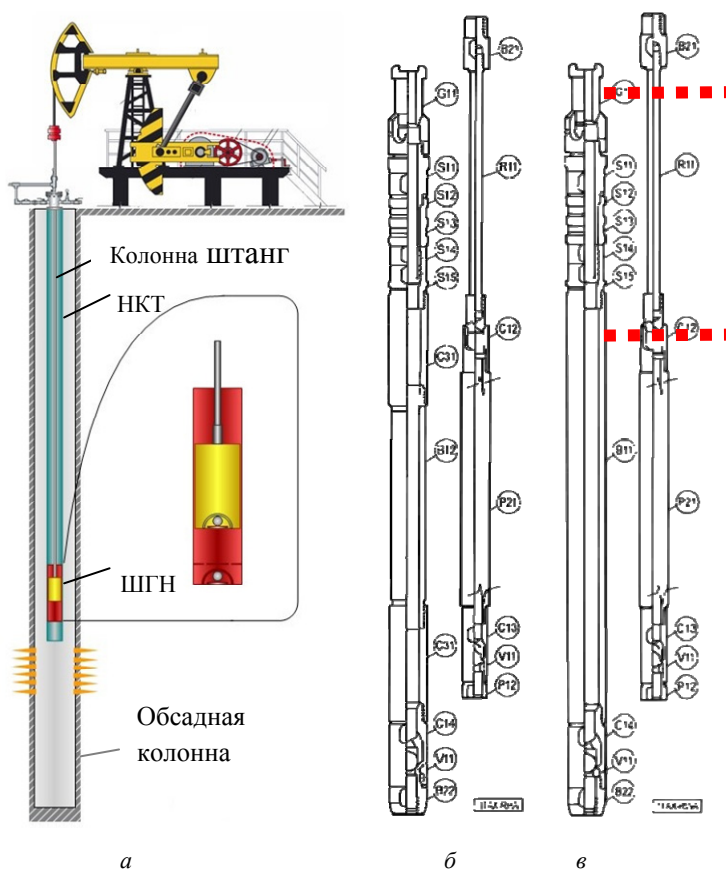


Рис. 1. Классический дизайн глубинно-насосного оборудования скважины (а), толстостенный ШГН (б), тонкостенный ШГН (в). Красным пунктиром приведены типичные места разрушения

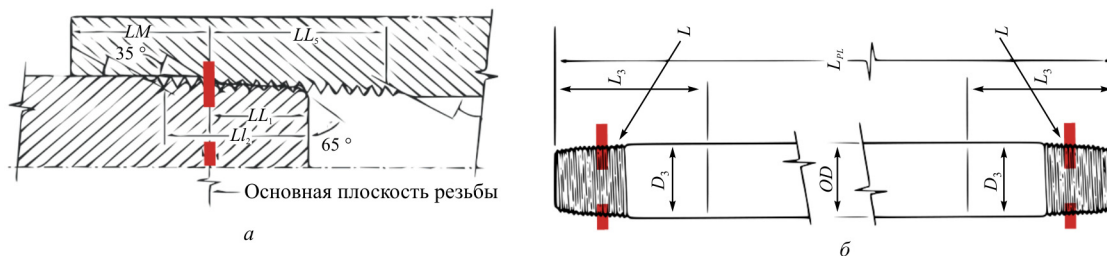


Рис. 2. Резьбовое соединение штока (а); эскиз штока насоса R11 (б). Штриховой линией показаны плоскости типичных разрушений резьбы API LP mod 1/2"-14

Таблица 1

Случаи разрушения штоков насосных модели ШГН 25-200 RWAM по резьбе

Эксплуатационный фактор	Усл. № 1 /sample #1 Скважина № 4289М	Усл. № 2 /sample #2 Скважина № 7653	Усл. № 3 /sample #3 Скважина № 17149
Мех. свойства	$\sigma_T = 436$ МПа, $\sigma_B = 687$ МПа, 208 НВ	$\sigma_B = 700$ МПа, 207 НВ	$\sigma_T = 826$ МПа, $\sigma_B = 955$ МПа, 244 НВ
Средняя нагрузка на шток в цикле качания, кгс	2700	1828	2622

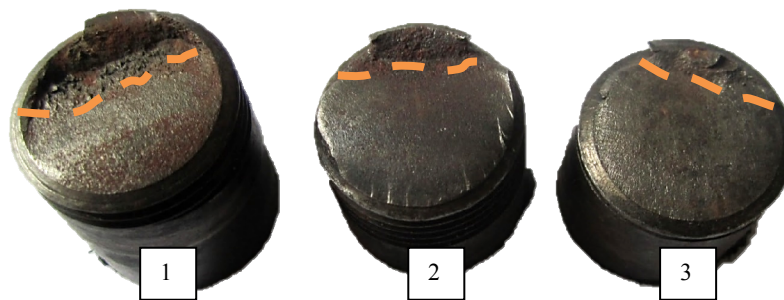


Рис. 3. Общий вид поверхностей разрушения штоков насосных, представленных на исследование, до очистки. Номера у поверхностей разрушения соответствуют условным номерам, присвоенным фрагментам штоков. Штриховыми линиями показаны границы зоны долома

Общий фрактографический анализ показал, что поверхности разрушения представленных штоков однотипны: во всех трех случаях разрушение началось во впадине витка резьбы, т.е. в зоне действия концентратора напряжений; трещина зародилась на одном конце диаметра и росла к противоположной стороне [2]. Возможно, кроме растягивающих напряжений на все три штока действовал дополнительный изгибающий момент. Зоны долома на всех трех штоках очень небольшие, что может говорить о невысоком уровне действующих напряжений и/или о достаточно высокой трещиностойкости материала. На большей части поверхностей разрушения присутствуют признаки коррозии. Рельеф поверхности разрушения во всех случаях сглаженный, поверхности разрушения словно притертые, с признаками блеска.

Таким образом, по совокупности признаков можно предварительно говорить о том, что разрушение штоков было либо усталостным, либо коррозионно-усталостным [3].

Определение химического состава материала штоков насосных

Химический состав материала штоков насосных, представленных на исследование, определяли с помощью поверенного оптико-эмиссионного спектрометра марки Oxford Instruments Analytical, модель PMI MASTER UVR Pro, по ГОСТ 18895–97. Установлено, что материалом штоков усл. № 1 и № 3 является сталь 40X по ГОСТ 4543–71, а материалом штока усл. № 2 – сталь 15X2ГМФ.

Результаты общего металлографического анализа материала штоков

Для проведения общего металлографического анализа после отделения небольших фрагментов, включающих поверхности разрушения, от каждого из более крупных фрагментов было отрезано еще по одному фрагменту, на каждом из которых были приготовлены поперечный и продольный микрошлифы.

Металлургическое качество материала штоков проверяли в соответствии с требованиями ГОСТ 1778–70 методом Ш на нетравленных шлифах, выполненных в продольном направлении, при увеличении $\times 100$. Для более подробного анализа НВ в отдельных случаях использовали увеличение $\times 1000$. Использовали микроскоп Olympus GX-51. Пробоподготовка: для заливки микрошлифов использовали прибор Struers CitoPress-10, для приготовления микрошлифов – прибор Struers Tegamin-30.

Результаты оценки загрязненности материала штоков неметаллическими включениями позволяют утверждать, что металл штоков имеет вполне удовлетворительное металлургическое качество – балл загрязненности сульфидами строчечными не выше 1.

Микроструктура штока усл. № 1 показана ниже (рис. 4, а–в). Очевидно, что она представляет собой смесь квазиэвтектоида и избыточного феррита, расположенного в виде почти полностью замкнутой сетки по границам зерен бывшего аустенита. Размер большей части зерен бывшего аустенита находится в пределах 30–50 мкм. Доля феррита не превышает 10–15 %, что значительно меньше, чем в стали 40X после отжига (~40–45 %). Таким образом, можно говорить о том, что после аустенитизации было проведено ускоренное охлаждение, скорее всего на воздухе, т.е. нормализация.

В штоке усл. № 3, изготовленном из этой же марки стали (40X), структура также представляет собой смесь избыточного феррита и эвтектоида, однако необходимо указать на ряд существенных отличий (рис. 4, г–е). Во-первых, структура штока усл. № 3 состоит из *равноправных зерен* избыточного феррита и перлита. Структура в целом *более мелкозернистая*: размер зерен и феррита и эвтектоида не более 10–20 мкм. Доля эвтектоида составляет примерно 40–50 %, что соответствует его количеству в стали с 0,40 % в отожженном состоянии. В данном случае доля вырожденного перлита значительно меньше, чем в образце штока усл. № 1, а пластины традиционного перлита прослеживаются во многих зернах весьма четко.

Таким образом, в случае образца усл. № 3 охлаждение было значительно медленнее, чем в штоке усл. № 1. Наличие вырожденного или зернистого перлита в образцах штоков № 1 и № 3 говорит о том, что, скорее всего, после высокотемпературной обработки для них был проведен высокий отпуск, при этом его температура была ниже, а длительность меньше для штока усл. № 3.

Структура штока усл. № 2 кардинально отличается от структуры образцов штоков усл. № 1 и № 3 и

представляет собой смесь зерен избыточного феррита и отпущенного верхнего бейнита (рис. 5). В целом структура весьма дисперсная: размер зерен феррита и областей бейнита не превышает 20 мкм. Доля избыточного феррита значительно меньше по сравнению с медленным охлаждением при отжиге, поэтому в качестве высокотемпературной термообработки в данном случае была проведена нормализация, а в целом такая структура была, скорее всего, получена путем нормализации и последующего высокого отпуска.

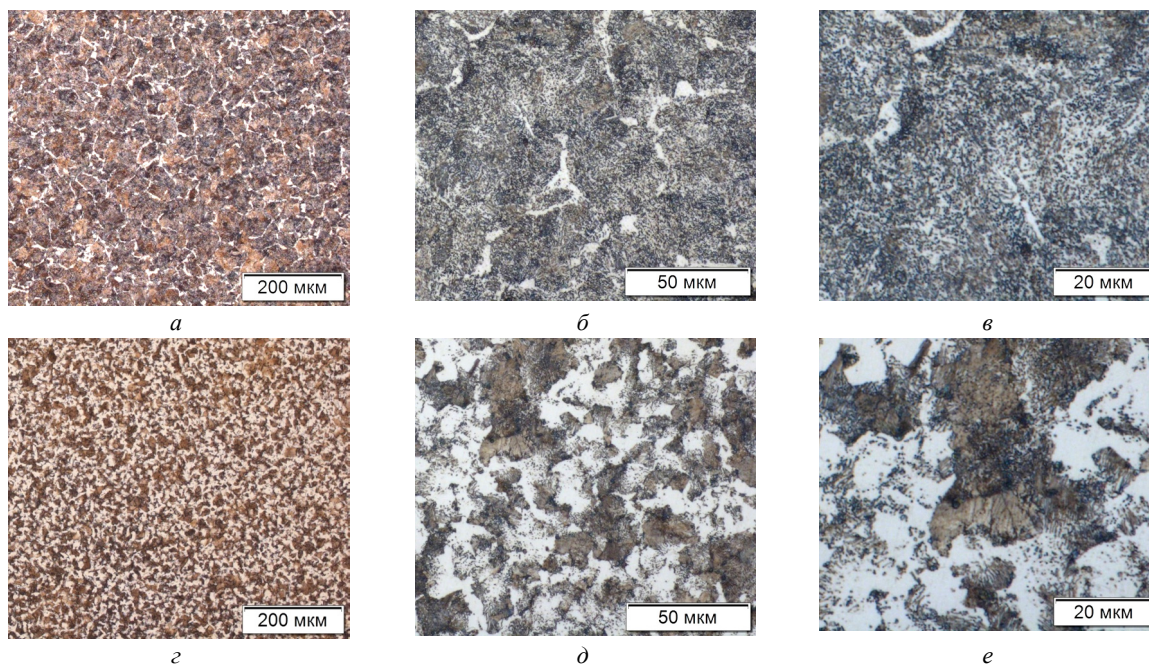


Рис. 4. Микроструктура штока усл. № 1 и № 3; шлиф поперечный. Усл. № 1: *a* – $\times 100$, *б* – $\times 500$, *в* – $\times 1000$; усл. № 3: шлиф поперечный; *з* – $\times 100$, *д* – $\times 500$, *е* – $\times 1000$

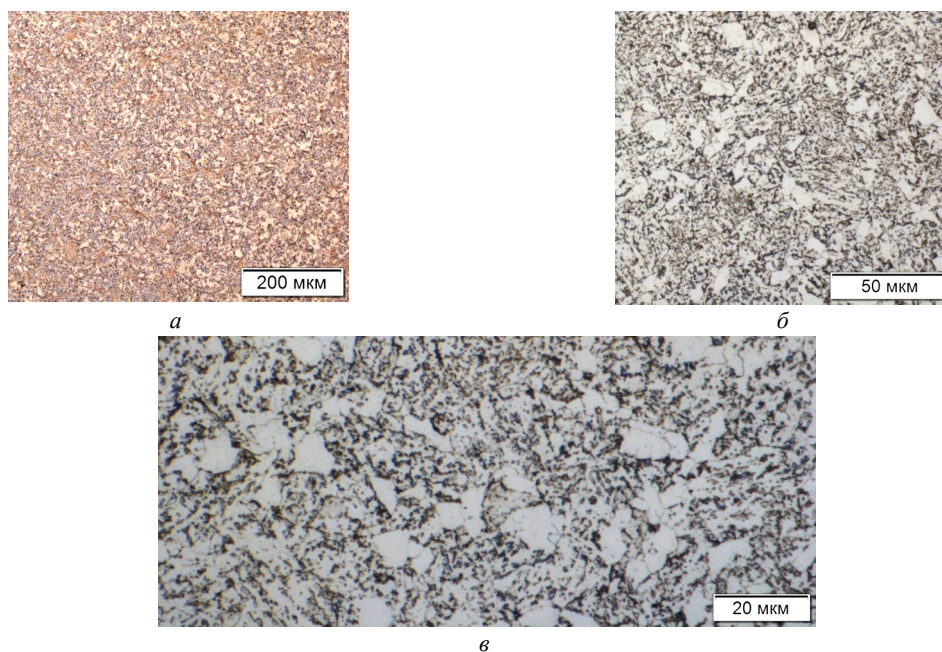


Рис. 5. Микроструктура штока усл. № 2; шлиф поперечный: *a* – $\times 100$, *б* – $\times 500$, *в* – $\times 1000$

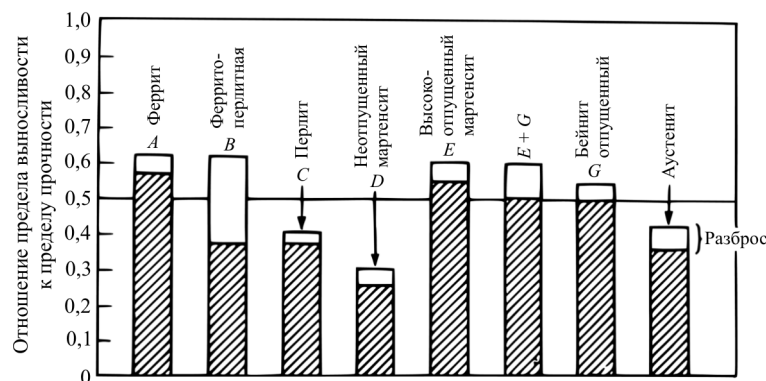


Рис. 6. Влияние микроструктуры на предел выносливости [5]

Вывод по причинам разрушения

Микроструктура исследованных образцов вполне удовлетворительная (табл. 2). Представленные штоки уверенно удовлетворяют требованиям API 11AX и имеют пригодную к циклическому нагружению микроструктуру, обуславливающую различие свойств и наработки [4, 5].

Таблица 2

Сопоставление микроструктуры и наработки

Номер	Усл. № 1	Усл. № 2	Усл. № 3
Наработка на отказ, сут	101<	<145<	<328
Тип микроструктуры с градацией по уровню предела выносливости (рис. 6)	C<	<G<	<B

Наработка штоков на отказ полностью коррелирует с градацией их микроструктур, представленной на схеме (см. рис. 6).

Все эти признаки говорят о том, что основной причиной разрушения штоков является усталость, зарождающаяся во впадинах витков резьбы штоков.

Можно сделать вывод, что микроструктура проката одного и того же завода-изготовителя различается от партии к партии. Нельзя исключать и различие микроструктур прутков внутри одной и той же партии, так как скорость охлаждения прутков в пачке зависит от их положения. Ясно, что чем ближе к периферии пачки, тем выше скорость их охлаждения. Таким образом, для гарантии качества стабильность микроструктуры должна быть управляема и взята под контроль.

Улучшить микроструктуру можно лишь термической обработкой на отпущенный мартенсит [6–8]. Тогда следует определить зону и глубину термической обработки. Для этого необходимо выполнить расчет напряжений и зон пластических деформаций в резьбе.

Расчет напряжений и зон пластических деформаций в резьбе

Шток не отличается сложностью, поэтому трудно определить ослабленный конструктивный элемент. Действительно, достаточно осмотреть эскиз штока, чтобы представить место разрушения (см. рис. 2).

Современная инженерно-техническая практика [9] рассматривает сильные дефекты, имеющие место в сварных швах, усталостных трещинах, коррозионных язвах, конструктивных элементах крепления и так далее, как дефекты, способные увеличить действующий уровень напряжения выше напряжения, которое будет рассчитано простым вычислением нагрузки на площадь поперечного сечения [10].

Наличие этой проблемы привело к созданию области инженерной науки, называемой механикой разрушения. Современные компьютерные программы, использующие цифровые технологии (исследование методом конечных элементов, метод граничных интегралов и т.д.), позволяют инженерам прогнозировать влияние различных дефектов и геометрии на прочность конструкций [11]. Уже на протяжении нескольких десятилетий известно влияние различных концентраторов напряжений на нефтепромысловые сооружения и для их анализа широко используется несколько программных пакетов.

Таким образом, становится ясно, что напряжения штока во впадинах резьбы существенно превышают напряжения по телу. Оценим, каких именно относительных значений может достигать такая концентрация напряжений.

Расчет напряжений в резьбе по формуле Инглиса

В присутствии концентратора напряжений действующее напряжение повышается. Это повы-

шение можно количественно оценить с помощью известной формулы Инглиса [12]:

$$\sigma_k = \sigma_n \left(1 + 2\sqrt{\frac{l}{\rho}} \right),$$

где σ_k – величина концентрированного напряжения; σ_n – величина номинального напряжения; l – длина концентратора; ρ – радиус при вершине концентратора напряжений.

Формула Инглиса применима к резьбе ограничено [13, 14], поскольку выведена для пластин, в которых образовано овальное отверстие. Шток же имеет существенно более сложную геометрию.

Ввиду этого в формулу Инглиса вводится корректирующая поправка [15], как это выглядит ниже:

$$\sigma_k = \sigma_n \left(1 + 2\sqrt{\frac{l}{\rho}} \gamma \right),$$

где γ – поправка, зависящая от отношения шага к высоте витка (S/l).

В упрощенном виде формула Инглиса будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma_k = K_k \sigma_n,$$

где K_k – коэффициент концентрации напряжений:

$$K_k = 1 + 2\sqrt{\frac{l}{\rho}} \gamma.$$

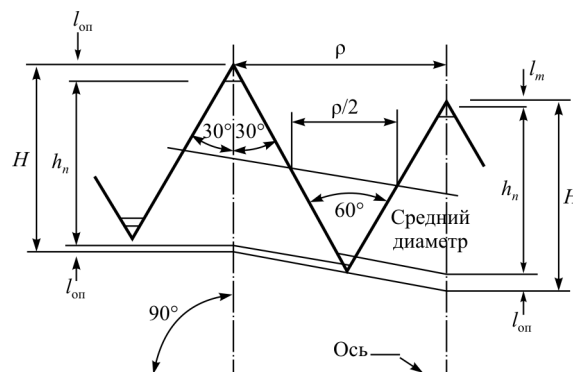
Благодаря профессору К. Инглису в практику расчетов на прочность вошло понятие «концентрация напряжений». Число, показывающее, во сколько раз местные напряжения превышают номинальные, называется коэффициентом концентрации напряжений и определяется формой выреза и свойствами материала [14].

Более современная формула представлена в Нормах расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок⁴. Применив рекомендуемые поправки⁵ для наиболее близкой по форме метрической резьбы, получим следующую уточненную формулу расчета коэффициента концентрации напряжений во впадине витка резьбы:

$$K_k = 1 + 1,57\sqrt{\frac{S}{\rho}}.$$

Иные исследователи уже проверили сходимость вышеприведенной формулы с результатами расчета методом конечных элементов [16].

Как известно, одним из самых мощных концентраторов напряжений является резьба. Во всех случаях очаг разрушения находился во впадине первого, самого нагруженного, витка резьбы от основной плоскости. Вычислим величину коэффициента концентрации напряжений.



(1)	(2)	(3)
Элемент резьбы	18 витков на 1" $\rho = 0,0556$ (1,412)	14 витков на 1" $\rho = 0,0714$ (1,814)
$l = 0,866\rho$	0,0481 (1,222)	0,0619 (1,571)
$h_b = h_n = 0,760\rho$	0,0422 (1,072)	0,0540 (1,379)
$f_0 = f_m = 0,033\rho$	0,0018 (0,047)	0,0024 (0,060)
$f_{ст} = f_{сп} = 0,073\rho$	0,0041 (0,103)	0,0052 (0,132)

Рис. 7. Параметры резьбы API LP mod 1/2"-14

Параметры резьбы API LP mod 1/2"-14 (рис. 7):

$$S = 1,814 \text{ мм}; \rho = 0,27 \text{ мм}.$$

Легко подсчитать, что

$$\sigma_k = \sigma_n \left(1 + 1,57\sqrt{\frac{1,814}{0,27}} \right) = 5,1\sigma_n.$$

Иными словами, напряжение во впадине резьбы почти в 5 раз выше номинального напряжения по телу штока. При этом резьба выполнена с максимальным возможным радиусом скругления 0,27 мм.

Управление микроструктурой

Приведем номинальные и концентрированные напряжения (табл. 3), учитывая, что номинальное напряжение представляет собой отношение средней растягивающей нагрузки (см. табл. 1) к площади сечения тела штока. Напряжение в концентраторе будет равно произведению номинального напряжения в основной плоскости резьбы ($\varnothing 19,772$ мм согласно

⁴ ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.

⁵ Там же.

спецификации API 11AX^{13ed.}) и K_k . Как уже указано выше, сечение конической резьбы меньше сечения тела штока ($\varnothing 22,23$ мм).

Таблица 3

Данные расчета

Нагрузка, тс	Номинальное напряжение по телу штока, МПа	K_k	Напряжение в концентраторе, МПа
3	76,01	5,1	485,75

Как показывает практика (см. табл. 1), шток не выдержал среднюю нагрузку цикла, не превышающую 3 тс. Но ведь этой нагрузке соответствует совершенно приемлемый уровень напряжений по телу штока, так как до предела текучести, пределов прочности и выносливости⁶ [17] еще очень далеко.

Таким образом, методы, улучшающие комплекс «микроструктура – прочность материала штока» целиком – на всей длине проката, уже не будут эффективны, поскольку дополнительные финансовые вложения для повышения и без того необходимого и достаточного уровня нецелесообразны. Превышение средних напряжений в 5,1 раз во впадине витка резьбы ясно фокусирует внимание именно на улучшении слабого места – резьбы.

В данном случае лучшим образом подойдут способы локальной термической обработки. Для этого метода останется лишь вычислить зону пластических деформаций (ЗПД) для оценки необходимой глубины ТО под впадиной резьбы. Для определения ЗПД лучшим образом подойдут методы конечных элементов [11, 18], отлично сходящиеся с результатами аналитических расчетов [16, 19, 20]. При незначительной глубине ЗПД дополнительно к термоулучшению могут быть применены и иные методы упрочнения, например накатка резьбы роликами или обкатка впадины витков [21, 22].

Ясно, что если выполнить улучшение резьбовых концов, управляя их микроструктурой, то штоки, вероятно, не разрушатся вплоть до 10^7 циклов⁷, отработав ожидаемый срок. Если и не все (штоки усл. № 1 и № 3 нагружены выше), то как минимум шток усл. № 2.

В настоящее время авторами проводятся сравнительные испытания предложенных способов локального упрочнения для экспериментального подтверждения сделанных выводов, а результаты тестов планируется опубликовать.

Заключение

Проведенное исследование ясно показывает, что исходное качество и механические свойства проката неодинаковы от партии к партии даже одного и того же завода-изготовителя. Всегда являясь достаточными по телу деталей вдали от концентраторов напряжений, эти девиации микроструктуры критически влияют на надежность и долговечность резьбы в опасных местах.

Совершенно ясно, что классические методы расчета напряжений делением нагрузки на площадь сечения больше не могут быть пригодными для обеспечения ожидаемого уровня надежности конструкций. Вне концентраторов напряжения безопасны и вероятность отказа близка к нулю. В рассмотренной резьбе напряжения во впадинах витков превосходят номинальные в 5,1 раз, что установлено аналитически (см. табл. 3).

Важность понимания нелинейного распределения напряжений по объему деталей дает правильный ключ к поиску наиболее эффективных методов обеспечения качества изделий, содержащих циклически нагруженные резьбы. При этом предлагается отодвинуть на второй план равномерное «сдабривание» проката дорогостоящим легированием или избавлением от вредных примесей и разнообразных неметаллических включений. Нужно управлять комплексом «микроструктура – свойства» материала именно там, где он имеет критически недостаточный уровень, ликвидируя уязвимость конструкции целиком для гарантии качества.

На наш взгляд, наиболее эффективным путем повышения надежности и долговечности циклически нагруженной резьбы является локальная термообработка.

Работа выполнена при поддержке АО «ЭЛКАМ-нефтемаш».

Список литературы

1. Георгиев М.Н., Симонов Ю.Н. Трещиностойкость железоуглеродистых сплавов: монография. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 418 с.
2. Дефекты и повреждения деталей и конструкций: монография / В.М. Кушнаренко, В.С. Репях, Е.Ю. Чирков, Е.В. Кушнаренко; Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург, 2011. – 402 с.
3. Фрактография и атлас фрактограмм / пер. с англ. Е.А. Шура; под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1982. – 489 с.

⁶ ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость (с изм. 1985 г.).

ASTM E466–07. Стандарт по проведению испытаний на усталость металлических материалов при осевом приложении силы с постоянной амплитудой.

⁷ ГОСТ 31825–2012. Штанги насосные, штоки устьевые и муфты к ним. Технические условия.

4. Breen D.H., Wene E.M. Fatigue in machines and structures-ground vehicles // *Fatigue and Microstructure / American Society for Metals, Metals Park OH.* – 1979. – 77 p.
5. Atlas of fatigue curves / ed. by Howard E. Boyer; Senior Technical Editor American Society for Metals. – 1990. – 534 p.
6. Симонов Ю.Н., Георгиев М.Н., Симонов М.Ю. Основы физики и механики разрушения: учеб. пособие для вузов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 203 с.
7. Симонов Ю.Н., Симонов М.Ю. Физика прочности и механические испытания металлов: курс лекций. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – 199 с.
8. Callister W.D., Rethwisch D.G. Materials Science and Engineering AN INTRODUCTION / The University of Utah. The University of Iowa. – U.S.A.: Wiley, 2014. – 990 p.
9. Heidersbach R. Metallurgy and corrosion control in oil and gas production. – John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 293 p.
10. Грудинин В.Г., Пачковский П.А. Выбор допускаемых напряжений при расчете соединений // Молодежный вестник ИРГТУ. – 2017. – № 2. – С. 8.
11. Tada H., Paris P.C., Irwin G.R. The stress analysis of cracks handbook. – New York: ASME, 31. NACE, 2000. – 515 p.
12. Штремель М.А. Разрушение: монография: в 2 кн. Кн. 1. Разрушение. – М.: Изд-во МИСиС, 2015. – 976 с.
13. Feargal P.B. Fatigue and fracture mechanics analysis of threaded connections / Department of Mechanical Engineering University College. – London, 1992. – 402 p.
14. Николаева Е.А. Основы механики разрушения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2010. – 103 с.
15. Никифоров А.Д. Точность и технология изготовления метрических резьб. – М.: Высшая школа, 1963. – 181 с.
16. Комарова Т.А., Кузьмин Ю.С., Федосов В.Г. К вопросу о концентрации напряжений в резьбовом соединении главного уплотнения реактора типа ВВЭР / ОАО «Ижорские заводы». – СПб., 2010. – 8 с.
17. Справочник металлиста. Т. 1. Свойства и выбор железа и сталей / Американское общество металловедов. – 9-я ред. – 1987. – 67 с.
18. Shigley J.E., Mischke C.R. Mechanical engineering design. – 5th ed. – McGraw-Hill, New York, 1989. – 123 p.
19. Irwin G.R. Plastic zone near a crack and fracture toughness // Proc. 7th Sagamore Conf. – New York: Raquette Lake, 1960. – P. IV-63.
20. Yokobori T. Fatigue crack propagation as successive stochastic process // Report Research Inst. Strength Fract. Mater. Tohoku Univ. – 1971. – Vol. 6. – P. 18.
21. Штремель М.А. Прочность сплавов: учеб. для вузов. Ч. 2. Деформация. – М.: Изд-во МИСиС, 1997. – 537 с.
22. Песин М.В. Повышение надежности резьбовых соединений нефтегазовых изделий // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 49–50.

References

1. Georgiev M.N., Simonov Iu.N. Treshchinostoičnost' zhelezouglerodistykh splavov [Crack resistance of iron-carbon alloys: a monograph]. Perm': Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 418 p.
2. Kushnarenko V.M., Repiakh V.S., Chirkov E.Iu., Kushnarenko E.V. Defekty i povrezhdeniia detalei i konstruksii: monografiia [Defects and damage to parts and structures]. Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, 2011, 402 p.
3. Fraktografiia i atlas fraktogramm [Fractography and atlas of fractograms]. Ed. M.L. Bernshteina. Moscow: Metallurgii, 1982, 489 p.
4. Breen D.H., Wene E.M. Fatigue in machines and structures-ground vehicles. *Fatigue and Microstructure. American Society for Metals, Metals Park OH*, 1979, 77 p.
5. Atlas of fatigue curves. Ed. Howard E. Boyer; Senior Technical Editor American Society for Metals, 1990, 534 p.
6. Simonov Iu.N., Georgiev M.N., Simonov M.Iu. Osnovy fiziki i mekhaniki razrusheniia [Fundamentals of Physics and Fracture Mechanics: Textbook for Higher Education Institutions]. Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo Issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2012, 203 p.
7. Simonov Iu.N., Simonov M.Iu. Fizika prochnosti i mekhanicheskie ispytaniia metallov [Physics of Strength and Mechanical Testing of Metals]. Permskogo natsionalnogo Issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2020, 199 p.
8. Callister W.D., Rethwisch D.G. Materials Science and Engineering AN INTRODUCTION. *The University of Utah. The University of Iowa. U.S.A.: Wiley*, 2014, 990 p.
9. Heidersbach R. Metallurgy and corrosion control in oil and gas production. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2011, 293 p.
10. Grudin V.G., Pachkovskii P.A. Vybora dopuskaemykh napriazhenii pri raschete soedinenii [Selection of allowable stresses when calculating connections]. *Molodezhnyi vestnik IRGTU*, 2017, no. 2, pp. 8.
11. Tada H., Paris P.C., Irwin G.R. The stress analysis of cracks handbook. New York: ASME, 31. NACE, 2000, 515 p.
12. Shtremel' M.A. Razrushenie: monografiia [Destruction: a monograph]. Moscow: Izdatelstvo MISiS, 2015, 976 p.
13. Feargal P.B. Fatigue and fracture mechanics analysis of threaded connections. *Department of Mechanical Engineering University College*. London, 1992, 402 p.
14. Nikolaeva E.A. Osnovy mekhaniki razrushe-niia [Fundamentals of Fracture Mechanics]. Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2010, 103 p.
15. Nikiforov A.D. Tochnost' i tekhnologiiia izgotovleniia metricheskikh rez'b [Precision and technology for metric threads]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1963, 181 p.
16. Komarova T.A., Kuz'min Iu.S., Fedosov V.G. K voprosu o konsentratsii napriazhenii v rez'bovom soedinenii glavnogo uplotneniia reaktora tipa VVER [On the Stress Concentration in the Threaded Joint of the Main Seal of the VVER-type Reactor]. Saint-Petersburg, 2010, 8 p.
17. Spravochnik metallista [Handbook for the metalworker]. Svoistva i vybor zheleza i stali. *Amerikanskoe obshchestvo metallovedov*, 1987, 67 p.

18. Shigley J.E., Mischke C.R. Mechanical engineering design. 5th ed. McGraw-Hill, New York, 1989, 123 p.

19. Irwin G.R. Plastic zone near a crack and fracture toughness. *Proc. 7th Sagamore Conf.* New York: Raquette Lake, 1960, pp. IV-63.

20. Yokobori T. Fatigue crack propagation as successive stochastic process. *Report Research Inst. Strength Fract. Mater. Tohoku Univ.*, 1971, vol. 6, p. 18.

21. Shtremel' M.A. Prochnost' splavov [Strength of alloys]. Moscow: Izdatelstvo MISiS, 1997, 537 p.

22. Pesin M.V. Povyshenie nadezhnosti rez'bo-vykh soedinenii neftegazovykh izdelii [Improving the reliability of threaded connections of oil and gas products]. *Tekhnologiya mashinostroeniia*, 2011, no. 9, pp. 49–50.

Получено 10.12.2020

Опубликовано 29.03.2021

Сведения об авторах

Мольцен Станислав Николаевич (Пермь, Россия) – студент кафедры металловедения и термической обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета; директор по качеству АО «ЭЛКАМ-нефтемаш», e-mail: stanislav@vputehod.ru.

Кравченко Андрей Владимирович (Пермь, Россия) – студент кафедры металловедения и термической обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета; инженер по качеству АО «ЭЛКАМ-нефтемаш», e-mail: andrew@vputehod.ru.

Симонов Юрий Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металловедения и термической обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: stanislav@vputehod.ru.

Полежаев Роман Михайлович (Пермь, Россия) – соискатель кафедры металловедения и термической обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета; технический директор АО «ЭЛКАМ-нефтемаш», e-mail: prm@elkam.ru.

About the authors

Stanislav N. Moltsen (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Metals and Heat Treatment, Perm National Research Polytechnic University; Head of Quality Service SC “ELKAM-neftemash”, e-mail: stanislav@vputehod.ru.

Andrew V. Kravchenko (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Metals and Heat Treatment, Perm National Research Polytechnic University; Expert of Quality SC “ELKAM-neftemash”, e-mail: andrew@vputehod.ru.

Yuri N. Simonov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Department of Metals and Heat Treatment, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: stanislav@vputehod.ru.

Roman M. Polezhaev (Perm, Russian Federation) – Researcher, Department of Metals and Heat Treatment, Perm National Research Polytechnic University, Head of Technical SC “ELKAM-neftemash”, e-mail: prm@elkam.ru.