

УДК 621.993.2

Повышение долговечности корпусов установок электроцентробежных насосов электромеханической обработкой

С.К. Федоров¹, Л.В. Федорова¹, Ю.С. Иванова¹,
Т.Р. Хуснетдинов¹, М.В. Воронина²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Increasing the durability of casings of electric centrifugal pump units by electromechanical treatment

S.K. Fedorov¹, L.V. Fedorova¹, Y.S. Ivanova¹,
T.R. Khusnetdinov¹, M.V. Voronina²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II

Теоретические исследования и практические разработки, выполненные в области электромеханической обработки наружной и внутренней резьб, позволяют повысить износо- и задиростойкость, прочность и усталостную долговечность деталей машин и технологического оборудования нефтяных компаний. Приведены результаты исследований по повышению долговечности корпуса установки электроцентробежного насоса из стали 22ГЮ путем упрочнения внутренней резьбы М93×2 электромеханической обработкой. Результаты исследований, разработанное и изготовленное оборудование, апробированная технология электромеханического упрочнения резьбы могут быть использованы производителями при изготовлении корпусов установок электроцентробежных насосов.

EDN: AIRBEI, <https://elibrary/airbei>

Ключевые слова: резьба М93×2, электромеханическая обработка, упрочнение резьбы, долговечность корпусов, электроцентробежный насос

To improve the reliability of machinery, it is not enough to engage only in the development and research of effective technological processes for hardening machine parts. It is necessary to introduce innovative technologies at enterprises and improve the level of training of engineering and technical specialists involved in the operation, maintenance and repair of equipment of domestic and foreign production. Insufficient reliability of machines leads to a decrease in the efficiency of enterprises as a result of forced downtime of equipment and the need for its replacement or repair. Theoretical research and practical developments carried out in the field of electromechanical processing of external and internal threads make it possible to increase the wear resistance, scuff resistance, strength and fatigue life of machine parts and technological equipment of oil companies. This paper presents the results of research on increasing the durability of the housings of electric centrifugal pumps made of 22GYU steel by strengthening the internal thread M93×2 by electromechanical treatment. The results of the conducted research, the developed and manufactured equipment, and the proven technology of electromechanical thread hardening can be used by manufacturers in the manufacture of housings for electric centrifugal pumps.

EDN: AIRBEI, <https://elibrary/airbei>

Keywords: thread M93×2, electromechanical processing, thread hardening, durability of casings, electric centrifugal pump

Повышение долговечности нефтепромыслового оборудования — актуальная задача, определяющая эффективность развития многих отраслей экономики Российской Федерации. Отличительной особенностью оборудования для добычи нефти является применение деталей с наружной и внутренней резьбой разного типа-размера [1–4]. Наиболее уязвимая часть деталей — резьба на оборудовании нефтегазопромысловой отрасли: бурильных, колонковых и обсадных трубах, переводниках, переходниках, насосно-компрессорных трубах (НКТ), муфтах НКТ, корпусах установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) и других изделиях. Резьба с низкой твердостью не обеспечивает длительную эксплуатацию изделий.

К основным проблемам деталей с резьбой нефтегазопромыслового оборудования относятся: низкое качество изготовления, невозможность производить конкурентоспособную продукцию по критериям износостойкости, прочности, усталостной долговечности, отсутствие оборудования и технологий для упрочнения резьбы на трубных базах нефтегазодобывающих компаний при ремонте, высокая трудоемкость, энергоемкость и себестоимость ремонта технологического оборудования [5–7].

Применение высококачественных конструкционных легированных сталей, различных технологий объемной термической и химико-термической обработок не позволяет изготовителям обеспечить требуемые физико-механические свойства резьбы по прочности, усталостной долговечности, износо- и задиристости [8–10].

Электроцентробежная насосная установка представляет собой комплекс оборудования, предназначенный для механизированной добычи жидкости из нефтяных скважин, содержащих нефть, воду, газ и механические примеси с помощью электроцентробежного насоса (ЭЦН, рис. 1, а), который соединен с погружным электродвигателем. Область применения установки — высокодебитные обводненные, глубокие и наклонные скважины с дебитами 10...1300 м³/сут и высотой подъема 500...3500 м.

Выпускают два вида УЭЦН — модульные и немодульные. В зависимости от количества компонентов, содержащихся в перекачиваемой

жидкости, ЭЦН имеют три исполнения: обычное, коррозионно-стойкое и повышенной износостойкости.

Корпуса ЭЦН (рис. 1, б), предназначенные для эксплуатации в нефтяных и газовых скважинах, изготавливают по ГОСТ Р 53366–2009, ГОСТ 31446–2017, API 5 CT, ГОСТ 633–80 и техническим условиям. Корпус 5 выполнен из стали 22ГЮ с возможной заменой на сталь 35 (ГОСТ 2590–88) и сталь AISI 1026 (с содержанием углерода 0,21...0,28 %). Головка 1 и основание 6, изготовленные из качественных среднеуглеродистых сталей, прошедших объемную термическую обработку на стадии заготовки (улучшение), соединены с корпусом посредством метрической резьбы. Внутри корпуса расположен вал 7, на котором установлены рабочие колеса 4, подшипники скольжения 2 и подпятник 3. В собранном виде ЭЦН поставляется нефтедобывающим компаниям.

Резьбовые соединения корпусов УЭЦН выполняют по ГОСТ Р 53365–2009, ГОСТ Р 51906–2015, APIS 5B, ГОСТ 633–80 и техническим условиям.

В производстве корпусов ЭЦН используют пять типов резьбы: четыре выполняют по стандартам США (рис. 2, а–г) и одну (с метрической резьбой) — по ГОСТ 24705–2004 (рис. 2, д). В последние годы стало актуальным импортозамещение зарубежных деталей и производство отечественной продукции, удовлетворяющей мировым стандартам. Внутреннюю резьбу нарезают на трубонарезных станках с ЧПУ резцами со специальной формой режущей пластины. Упрочняющую обработку резьбы корпусов УЭЦН не проводят.

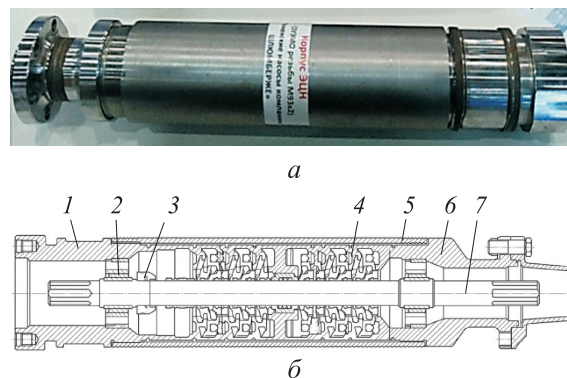


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) ЭЦН

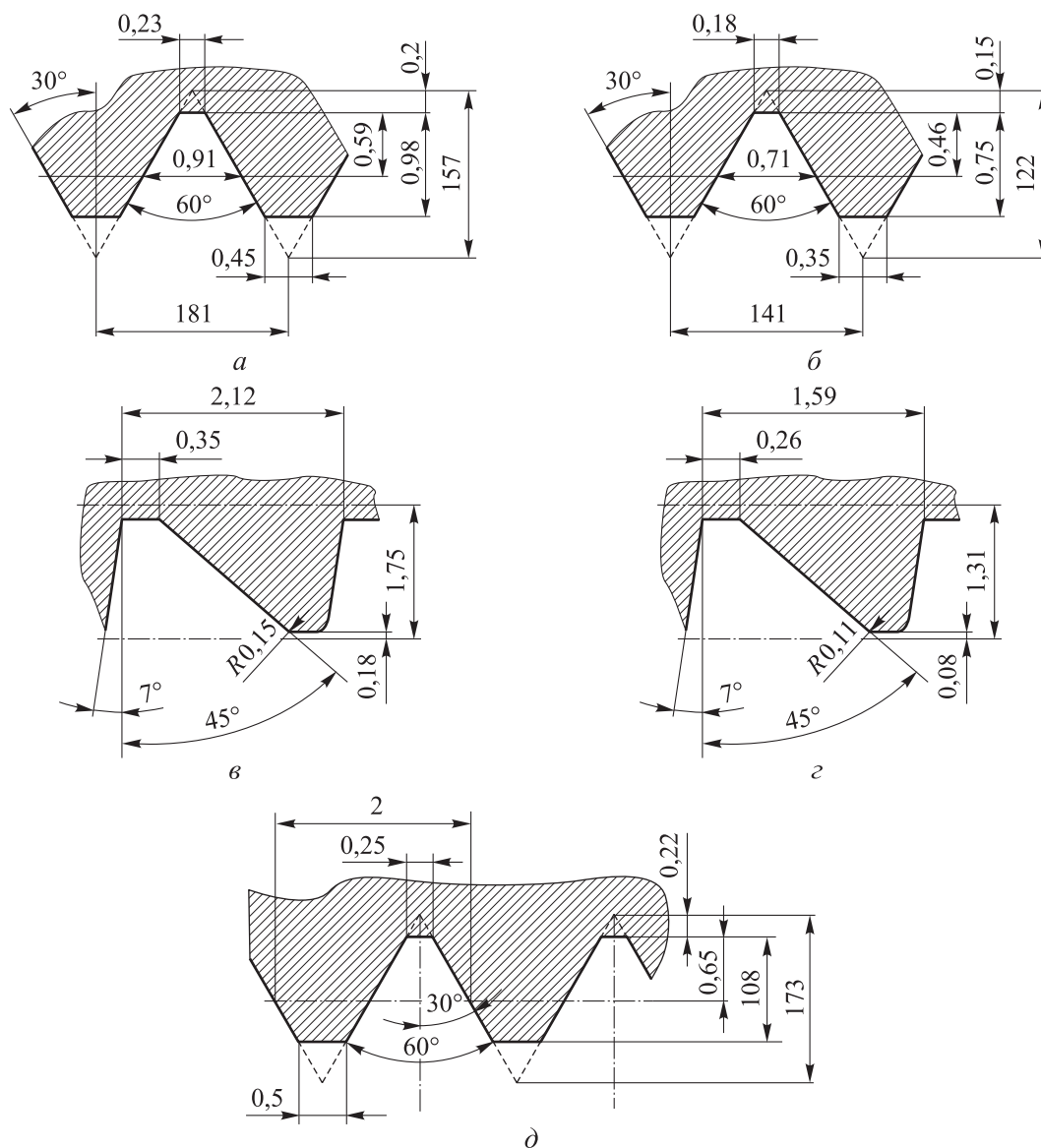
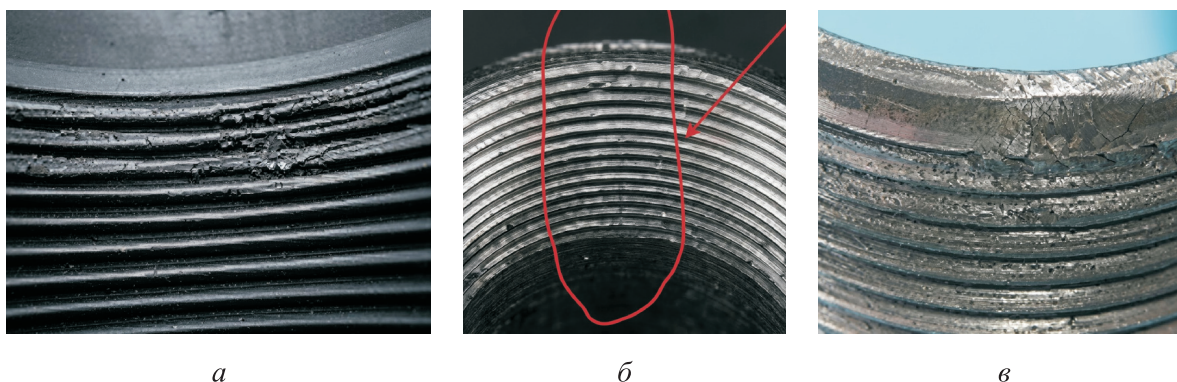


Рис. 2. Схемы различных резьб корпуса ЭЦН:

a — ANSI B1.1 (14 ниток, США); *б* — ANSI B1.1 (18 ниток, США); *в* — ANSI B1.9 (упорная, 12 ниток, США); *г* — ANSI B1.9 (упорная, 16 ниток, США); *д* — метрическая (ГОСТ 24705-2004, шаг 2 мм)



a

б

в

Рис. 3. Внешний вид характерных дефектов резьбы корпусов УЭЦН:

a — задиры; *б* — выкрашивание; *в* — смятие витков

УЭЦН являются достаточно сложным и высокотехнологичным оборудованием, содержащим много узлов и элементов. Последние могут выходить из строя под действием тех или иных факторов, что приведет к отказу всей установки. К отказам также относятся: первые отказы после бурения, ремонтные работы по устранению аварий со скважинным оборудованием (аварии с ЭЦН, НКТ), отказы по причине отложения в ЭЦН или НКТ солей, парафина, гидратов, засорения ЭЦН механическими примесями.

Основным дефектом корпуса ЭЦН является механическое повреждение резьбы (рис. 3, а–в), что может произойти во время эксплуатации или ремонтных работ. В первом случае срыв резьбы корпуса ЭЦН может привести к обрыву установки, а следовательно, к временному прекращению работы скважины. На стадии свинчивания, в процессе эксплуатации и развинчивания корпуса ЭЦН с основанием и головкой наблюдается дефект, связанный с микросваркой резьбового соединения. Развинчивание таких деталей сопровождается выкрашиванием витков резьбы корпуса, основания и головки УЭЦН.

Маршрутная технология изготовления корпуса УЭЦН включает в себя объемную термическую обработку, редуцирование, калибрование, нарезание внутренней резьбы, контрольные операции, гидравлические испытания, навинчивание предохранительных деталей и нанесение антикоррозионного покрытия, складирование.

Опытно-экспериментальные исследования по повышению долговечности внутренней мет-



Рис. 4. Внешний вид образцов с нарезанной резьбой

рической резьбы М93×2 корпуса УЭЦН выполнены в МГТУ им. Н.Э. Баумана с участием ООО «Технологическая компания Шлюмбердже» (г. Тюмень) и завода «Тюменские насосы Шлюмбердже». Испытуемые образцы (рис. 4) изготовлены производителем УЭЦН на станке с ЧПУ модели BNC 2840A (рис. 5). Нарезание резьбы М93×2 проведено в режимах, используемых заводом «Тюменские насосы Шлюмбердже». Контроль качества резьбы по геометрическим параметрам выполнен предельными резьбовыми калибрами.

Применяемые и перспективные методы поверхностного упрочнения, (объемная термическая обработка, лазерная закалка, закалка токами высокой частоты, азотирование, карбонитрация), помимо достоинств, имеют существенные недостатки при обработке наружной и внутренней резьб [10, 11]. Выполнить объемную закалку резьбовых деталей (особенно на тонкостенных трубных заготовках) затруднительно, даже на специализированных предприятиях. В процессе нагрева, выдержки и охлаждения возникают дефекты



Рис. 5. Внешний вид трубонарезного станка с ЧПУ модели BNC 2840A

Химический состав стали 22ГЮ

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
C	0,18	N	0,08
Si	0,32	Ti	0,03
Mn	1,24	Al	0,04
S	0,01	Ca	0,01
Cr	0,34	–	–

окисления и обезуглероживания поверхностей, появляются микротрещины термического характера, происходит коробление деталей, а в опасных сечениях формируются остаточные напряжения растяжения. С учетом того, что резьбовые детали являются ответственными и зачастую определяют безопасность и долговечность УЭЦН, устанавливать их с перечисленными дефектами запрещено.

Теоретические разработки и опытно-экспериментальные исследования, выполненные в области электромеханической обработки (ЭМО) резьбы профессором Б.М. Аскинази и его учениками [12–15], указывают на высокую эффективность метода при упрочнении внутренней резьбы трубных заготовок.

Химический состав стали 22ГЮ после спектрального анализа приведен в таблице.

ЭМО, относящаяся к методам обработки поверхностного слоя деталей концентрированным потоком электрической энергии, гарантированно обеспечивает закалку сталей 22ГЮ на высокую твердость (рис. 6, а). Наличие в стали 22ГЮ легирующих элементов (рис. 6, б) также

способствует повышению качества поверхностного слоя деталей.

Марганец (1,24 %), обеспечивает прокаливаемость, не образует усадочных трещин и снижает вероятность деформаций. Кремний (0,32 %) в сочетании с закалкой повышает прочность витков резьбы, а хром (до 0,34 %) — коррозионную стойкость. Небольшое количество азота (0,08 %) увеличивает не только прочность, но и ударную вязкость. Кальций (0,01 %) в сочетании с алюминием (0,04 %) выступает как модификатор.

Основными факторами, влияющими на качество поверхности при ЭМО $F_{ЭМО}$, являются оптимальные температурные X_1 , временные X_2 , скоростные X_3 , силовые X_4 и технологические X_5 характеристики, а суммарные затраты $Z_{сум}$ упрочнения должны быть оптимальными и обеспечивать требуемые физико-механические свойства резьбы корпусов при низкой вероятности возникновения дефектов Δf :

$$F_{ЭМО} = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \rightarrow \max \\ \text{при } Z_{сум} \rightarrow \min \text{ и } \Delta f \rightarrow \min.$$

ЭМО резьбы осуществляется инструментом, деформирующие элементы которого взаимодействуют с обрабатываемой внутренней поверхностью корпуса УЭЦН по схемам качения, скольжения или внедрения. На этих элементарных схемах или их сочетании основаны предлагаемые методы ЭМО резьбы корпуса УЭЦН.

ЭМО резьбы корпуса УЭЦН выполняли двухроликовой державкой (рис. 7, а). Консольная конструкция державки позволяет снизить

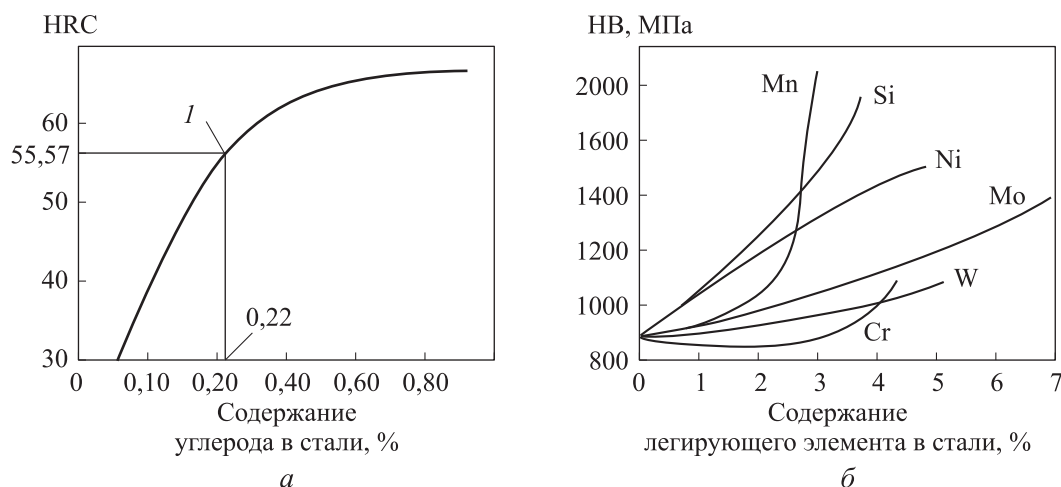


Рис. 6. Зависимости твердости образца от содержания углерода (а) и легирующих элементов (б) в стали при закалке:

1 — максимальная твердость стали с 0,22%-ным содержанием углерода

требования к точности центрирования обрабатываемых деталей, так как она служит своеобразным пружинящим элементом, а шток державки имеет возможность перемещения относительно основания на длину хода тарированной спиральной пружины. Такая конструкция державки дает возможность уменьшить потери электрической энергии, увеличить производительность, удешевить и упростить технологию упрочнения резьбы ЭМО.

ЭМО осуществляют следующим образом (рис. 7, б). В трехкулачковый патрон станка устанавливают и закрепляют корпус 1 УЭЦН, а в резцедержатель станка — телескопическую державку с подведенными к ней через электропроводные тяги 3 токоподводящими шинами 4. Инструментальные пластины (ролики) 2, размещаемые во впадинах резьбы корпуса, обеспечивают прижатие роликов к резьбе. Ролики смещены на половину $l/2$ длины резьбы l корпуса УЭЦН, что позволяет сократить время обработки в 2 раза.

Затем включают вращение заготовки и обеспечивают подачу электрического тока от установки ЭМО (УЭМО) в зону контакта инстру-

ментальных роликов и резьбы корпуса УЭЦН. При подходе инструментального ролика к концу обрабатываемой резьбы срабатывает концевой выключатель, который отключает подачу электрического тока от установки ЭМО. Самопроизвольное размыкание цепи во время обработки недопустимо, так как это приведет к короткому замыканию и повреждению обрабатываемой поверхности детали и инструментов.

Концевой выключатель ВПК 2010 УХЛ4 (сила тока $I = 10$ А, напряжение $U = 660...440$ В) подключают к органам управления станком. При срабатывании выключатель подает сигнал на пульт управления станком и останавливает установку ЭМО, тем самым предотвращая попадание роликов в канавку после резьбы. Инструментальные ролики отводят от резьбы, и извлекают державку из обработанного корпуса.

Высокая эффективность способов ЭМО внутренней резьбы корпусов УЭЦН (рис. 8), связана не только с тем, что способ основан на контактной обработке поверхностей высококонцентрированным потоком электрической энергии, но и с объединением силового и термического воздействий инструмента на резьбу

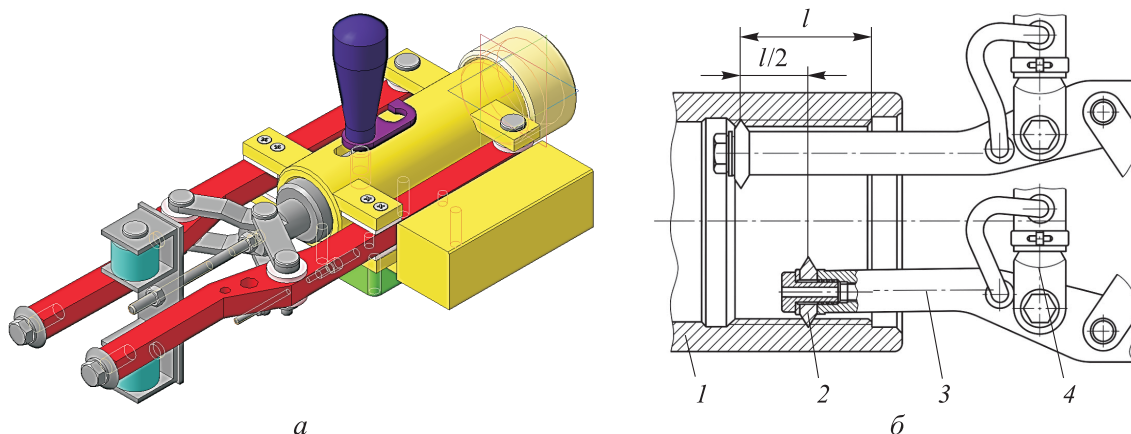


Рис. 7. Внешний вид державки (а) и принципиальная схема (б) ЭМО резьбы

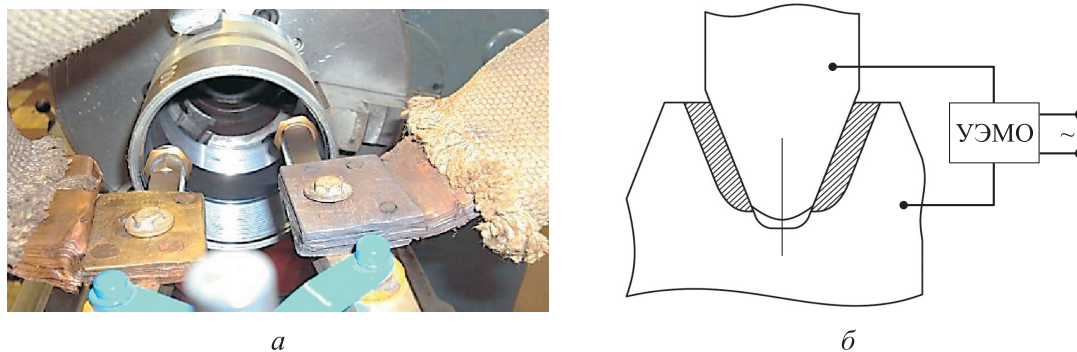


Рис. 8. Внешний вид (а) и схема упрочнения (б) резьбы корпуса ЭМО

корпуса в единой технологической схеме. Это позволяет формировать высокие эксплуатационные свойства поверхностного слоя резьбы деталей, недоступные ни одному из существующих способов обработки [9, 12–15]. При ЭМО геометрические параметры резьбы детали и профиль инструмента должны быть идентичными.

Эффект термомеханического поверхностного пластического деформирования, наблюдаемый при ЭМО в условиях высокотемпературного нагрева, приводит к изменению микрогеометрических параметров боковых поверхностей резьбы и зоны основания. Вершины микронеровностей под действием температуры оплавляются, а под направленным силовым воздействием со стороны инструмента металл заполняет микровпадины. Металл микровпадин, находясь в условиях напряженного состояния, перемещается по пути наименьшего сопротивления, поднимаясь вверх. При этом радиус глубоких микровпадин увеличивается, а вершины микронеровностей приобретают плоские участки.

Таким образом, при ЭМО поверхность приобретает форму, характерную для этапа нормальной эксплуатации, т. е. приработка поверхности происходит на стадии ее изготовления. В режиме ЭМО размер вершин микронеровностей резьбы уменьшается на 10...15 % шероховатости после резбонарезания.

Одновременное протекание фазовых превращений с получением структуры закалки позволяет компенсировать изменение размера от термомеханического упрочнения твердосплавным инструментом. При нагреве поверхностного слоя до температуры более 1000 °С и скорости охлаждения до 2600 °С/с аустенит в поверхностном слое переходит в мартенсит. Удельный объем последнего в 1,046 раза больше, чем у аустенита. Следовательно, переход

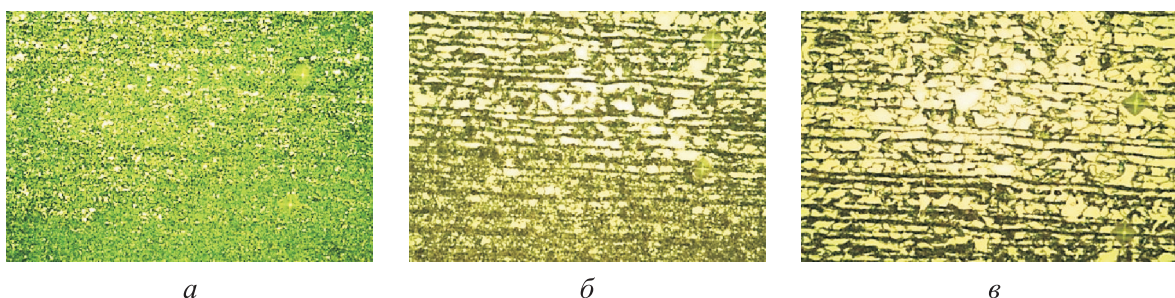


Рис. 9. Микроструктура боковой поверхности резьбы после ЭМО при увеличении $\times 200$

$\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$ приводит к увеличению размера поверхности, компенсируя тем самым его уменьшение вследствие термомеханического деформирования.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе GX-51 фирмы OLYMPUS с оптикой Carl Zeiss AxioObserver.D1m при увеличении 200...1000 крат. Микрошлифы изготавливали по традиционной методике — шлифованием, полированием и травлением. Резку образцов выполняли на установке Discotom-6. Для резки образцов использовали отрезные диски 40A25. Нарезанные образцы после удаления грубых заусенцев с помощью алмазных надфилей разной зернистости запрессовывали в смолу Durofast на установке CitoPress-20.

Полирование и шлифование образцов проводили на специальной установке с поэтапным использованием шлифовальных и полировальных дисков разной зернистости. После каждого этапа образцы и установку промывали для удаления частиц металла. Полирование выполняли на диске с сукном, смачиваемом водной суспензией, которая содержала абразивные частицы размером 9, 3 и 1 мкм. Травление шлифов осу-



а

б

в

Рис. 10. Микроструктура стали 22ГЮ после ЭМО при увеличении $\times 500$:
а — поверхность (HV 4720 МПа); б — переходная зона (HV 3500...2500 МПа);
в — исходная строчечная структура (HV 1900...2100 МПа)

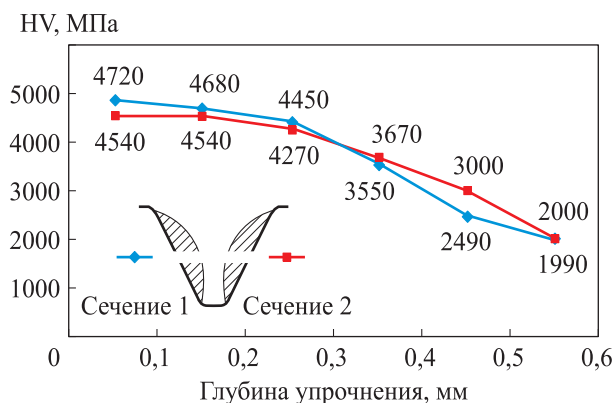


Рис. 11. Зависимость микротвердости HV от глубины упрочнения по сечению среднего диаметра метрической резьбы М93×2 после ЭМО

ществляли в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Измерение микротвердости образцов проводили на приборе DuraScan вдавливанием алмазной пирамиды при нагрузке 98 Н.

Анализ результатов исследования упрочненного поверхностного слоя витков резьбы свидетельствует о формировании градиентной структуры (рис. 9 и 10). Металлографическими исследованиями резьбы М93×2 стали 22ГЮ после ЭМО установлено повышение микротвердости поверхностного слоя резьбы до HV 4720 МПа на глубине до 0,20 мм. В результате ЭМО изменяется структура поверхностного слоя резьбы, происходит измельчение зерен металла и ликвидируется их строчечная ориентация (рис. 10, а). На рис. 9 и 10, б отчетливо видна переходная зона от упрочненного металла до исходной ферритно-перлитной структуры (рис. 10, в).

Зависимость микротвердости от глубины упрочнения в сечении среднего диаметра метрической резьбы М93×2 после ЭМО (рис. 11) свидетельствует о структурно-фазовых изменениях поверхностного слоя на глубине до 0,45 мм. Микротвердость с правой и левой сторон витков резьбы на глубине до 0,25 мм различная, что обусловлено двумя особенностями процессов, происходящих при ЭМО витков резьбы.

Во-первых, при движении инструмента по профилю резьбы термическому воздействию подвергается сечение 1, и скорость охлаждения его поверхностного слоя более высокая. Термический нагрев витков резьбы по сечению 2 и последующее охлаждение нагретого витка при-

водят к меньшей скорости охлаждения и, как следствие, меньшей твердости.

Во-вторых, термомеханическое воздействие силового фактора влияет на твердость поверхностного слоя. При ЭМО усилия прижатия инструмента к резьбе с правой и левой сторон витков будут различаться. Помимо статического усилия прижатия инструмента к заготовке, при ЭМО резьбы на одну из сторон действует усилие от подачи. Это сказывается на температуре в зоне контакта и, как следствие, на снижении твердости поверхностного слоя. Микротвердость поверхностного слоя по сечению 2 на глубине 0,25 мм незначительно отличается (менее 5 %) от твердости по сечению 1 (для стали 22ГЮ).

Выводы

1. Установлено, что при изготовлении корпусов УЭЦН из стали 22ГЮ внутренняя резьба не подвергается упрочнению, имеет ферритно-перлитную структуру, строчечную текстуру волокон металла с твердостью 1900...2100 МПа, что приводит к быстрому износу резьбовых соединений и снижению эффективности нефтегазодобывающих компаний.

2. Разработаны оборудование и технология финишного упрочнения внутренней резьбы М93×2 корпусов УЭЦН после ее резбонарезания комбинированными потоками электрической энергии промышленной частоты с одновременной термомеханической обработкой без изменения точностных и геометрических показателей.

3. Металлографическими исследованиями установлено, что после финишной ЭМО поверхностный слой боковых сторон резьбы является градиентным и характеризуется: мелкодисперсной микроструктурой глубиной до 0,25 мм и твердостью до 4720 МПа; переходной структурой глубиной до 0,20 мм и твердостью 3500...2500 МПа; отсутствием строчечности текстуры волокон металла; исходной структурой твердостью (1900...2100 МПа) внутри витков резьбы.

4. По результатам испытаний резьбовых соединений на свинчивание–развинчивание выявлено 3–5-кратное увеличение износостойкости по сравнению с таковой для продукции производителей корпусов УЭЦН.

Литература

- [1] Сафиуллин Р.Р., Матвеев Ю.Г., Бурцев Е.А. *Анализ работы установок электроцентробежных насосов и технические методы повышения их надежности*. Уфа, Изд-во УГНТУ, 2011. 89 с.
- [2] Ласуков Р.Я. Анализ причин преждевременных отказов при эксплуатации УЭЦН в пластах группы восточно-сургутского месторождения и методы борьбы с ними. *Науки о земле*, 2015, № 11, с. 71–76.
- [3] Ухалов К.А., Кучумов Р.Я. Методология оценки эксплуатационной надежности работы УЭЦН. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*, 2002, № 4, с. 26–29.
- [4] Пономарев Р.Н., Ишмурзин А.А. Анализ причин отказов установок погружных центробежных насосов на месторождениях ООО «Лукойл-Западная Сибирь». *Нефтяное хозяйство*, 2001, № 4, с. 58–62.
- [5] Pakhomova S.A., Fakhurtdinov R.S., Zhavoronkova E. et al. Investigation of the contact fatigue strength of high quality carburised steel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1129, art. 012027, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1129/1/012027>
- [6] Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A. Advantages and commercial application problems of vacuum carburization. *Polym. Sci. Ser. D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 79–83, doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421217010063>
- [7] Pakhomova S.A., Manayev O.I. Effect of heat shotblast treatment exerted on the contact fatigue of carburised heat-resistant steel C0.12Cr2NiWV. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 732–735, doi: <https://doi.org/10.1134/S2075113318040251>
- [8] Фахриева К.Р., Габдрахимов М.С. Анализ отказов установок электроцентробежных насосов НГДУ «Туймазанефть». *Нефтегазовое дело*, 2013, № 1. URL: <https://ogbus.ru/article/view/analiz-otkazov-ustanovok-elektrocentrobezhnykh-nasosov-ngdu-tuj>
- [9] Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Зарипов В.Н. и др. Повышение долговечности резьбовых соединений электромеханической обработкой. В: *Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов*. Курск, ЮЗГУ, 2020, с. 228–231.
- [10] Куксенова Л.И., Симонов В.Н., Алексеева М.С. и др. Исследование трения, износа и противозадирной стойкости тяжело нагруженных азотированных сопряжений. *Трение и износ*, 2021, т. 42, № 3, с. 319–328, doi: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-3-319-328>
- [11] Трулев А.В., Тимушев С.Ф., Ломакин В.О. др. Проблемы разработки месторождений тяжелых нефтей со сложными геологическими условиями и пути их решения. *Нефть газ новации*, 2020, № 2, с. 55–60
- [12] Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Воронина М.В. Повышение надежности резьбовых соединений электромеханической обработкой. *Записки Горного института*, 2017, т. 226, с. 456–461, doi: <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.4.456>
- [13] Федорова Л.В., Федоров С.К., Славин А.В. и др. Структура и микротвердость резьбы насосно-компрессорных труб после финишной электромеханической поверхностной закалки. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2020, № 2, с. 58–64.
- [14] Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С. Повышение долговечности труб буровых стальных универсальных финишной электромеханической поверхностной закалкой. *Вестник машиностроения*, 2024, т. 103, № 11, с. 948–953.
- [15] Федорова Л.В., Федоров С.К., Иванова Ю.С. и др. Перспективные методы электромеханической обработки резьбы. *Механика и машиностроение. Наука и практика*, 2024, № 7, с. 80–83, doi: <https://doi.org/10.26160/2658-6185-2024-7>

References

- [1] Safiullin R.R., Matveev Yu.G., Burtsev E.A. *Analiz raboty ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov i tekhnicheskie metody povysheniya ikh nadezhnosti* [Analysis of the operation of electric centrifugal pumps and technical methods for increasing their reliability]. Ufa, Izd-vo UGNTU Publ., 2011. 89 p. (In Russ.).

- [2] Lasukov R.Ya. Analysis of the causes of premature failures during operation of ESP in the formations of the East-Surgut field group and methods of combating them. *Nauki o zemle*, 2015, no. 11, pp. 71–76. (In Russ.).
- [3] Ukhlov K.A., Kuchumov R.Ya. Methodology for assessing the operational reliability of the ESP. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz* [Oil and Gas Studies], 2002, no. 4, pp. 26–29. (In Russ.).
- [4] Ponomarev R.N., Ishmurzin A.A. Analysis of reasons for submersible centrifugal pumps failures in Lukoil – Western Siberia OOO fields. *Neftyanoe khozyaystvo* [Oil Industry], 2001, no. 4, pp. 58–62. (In Russ.).
- [5] Pakhomova S.A., Fakhurtdinov R.S., Zhavoronkova E. et al. Investigation of the contact fatigue strength of high quality carburised steel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1129, art. 012027, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1129/1/012027>
- [6] Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A. Advantages and commercial application problems of vacuum carburization. *Polym. Sci. Ser. D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 79–83, doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421217010063>
- [7] Pakhomova S.A., Manayev O.I. Effect of heat shotblast treatment exerted on the contact fatigue of carburised heat-resistant steel C0.12Cr2NiWV. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 732–735, doi: <https://doi.org/10.1134/S2075113318040251>
- [8] Fakhrieva K.R., Gabdrakhimov M.S. Analysis of work of installations of electrocentrifugal pumps NGDY “TUYMAZANEFT”. *Neftgazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2013, no. 1. URL: <https://ogbus.ru/article/view/analiz-otkazov-ustanovok-elektrocentrobezhnyh-nasosov-ngdu-tuj> (in Russ.).
- [9] Fedorova L.V., Ivanova Yu.S., Zaripov V.N. et al. Improving rebuilding thread connection by electromechanical processing. V: *Sovremennye problemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termicheskoy obrabotki metallov i splavov* [Modern problems and Directions of Development of Metal Science and Heat Treatment of Metals and Alloys]. Kursk, YuZGU Publ., 2020, pp. 228–231. (In Russ.).
- [10] Kuksenova L.I., Simonov V.N., Alekseeva M.S. et al. Research of friction, wear, and seizure resistance of extra high loaded nitrided couplings. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 319–328, doi: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-3-319-328> (in Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 204–210, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366621030090>)
- [11] Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O. et al. Problems and ways to solve the development of heavy oil fields with complex geological conditions. *Neft gaz novatsii*, 2020, no. 2, pp. 55–60. (In Russ.).
- [12] Fedorova L.V., Ivanova Yu.S., Voronina M.V. Improvement of threaded joint reliability by means of electromechanical processing. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2017, vol. 226, pp. 456–461, doi: <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.4.456> (in Russ.).
- [13] Fedorova L.V., Fedorov S.K., Slavin A.V. et al. Structure and microhardness of tubing thread after finishing electromechanical surface quenching. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2020, no. 2, pp. 58–64. (In Russ.).
- [14] Fedorov S.K., Fedorova L.V., Ivanova Yu.S. Increasing the durability of universal steel drill pipes by final electromechanical surface hardening. *Vestnik mashinostroeniya*, 2024, vol. 103, no. 11, pp. 948–953. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Engin. Res.*, 2025, vol. 45, no. 1, pp. 67–72, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X24703556>)
- [15] Fedorova L.V., Fedorov S.K., Ivanova Yu.S. et al. Promising methods of electromechanical thread processing. *Mekhanika i mashinostroyeniye. Nauka i praktika*, 2024, no. 7, pp. 80–83, doi: <https://doi.org/10.26160/2658-6185-2024-7> (in Russ.).

Информация об авторах

ФЕДОРОВ Сергей Константинович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: momd@yandex.ru).

ФЕДОРОВА Лилия Владимировна — доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: fedorova.lv@bmstu.ru).

ИВАНОВА Юлия Сергеевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ivanovays@bmstu.ru).

ХУСНЕТДИНОВ Тимур Рустямович — старший преподаватель кафедры «Инженерная графика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Timur_bmstu_rk@mail.ru).

ВОРОНИНА Марианна Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Начертательной геометрии и графики». Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, e-mail: mariannavv260475@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Хуснетдинов Т.Р., Воронина М.В. Повышение долговечности корпусов установок электроцентробежных насосов электромеханической обработкой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 5, с. 50–60.

Please cite this article in English as:

Fedorov S.K., Fedorova L.V., Ivanova Y.S., Khusnetdinov T.R., Voronina M.V. Increasing the durability of casings of electric centrifugal pump units by electromechanical treatment. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 5, pp. 50–60.

Information about the authors

FEDOROV Sergey Konstantinovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technologies of Materials Processing. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: momd@yandex.ru).

FEDOROVA Liliya Vladimirovna — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technologies of Materials Processing. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: fedorova.lv@bmstu.ru).

IVANOVA Yulia Sergeevna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technologies of Materials Processing. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ivanovays@bmstu.ru).

KHUSNETDINOV Timur Rustyamovich — Senior Lecturer, Engineering Graphics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: Timur_bmstu_rk@mail.ru).

VORONINA Marianna Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Descriptive Geometry and Graphics. St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II (199106, St. Petersburg, Russian Federation, Line 21, Bldg. 2, e-mail: mariannavv260475@mail.ru).