

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96

## Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления\*

**В. В. Муравьев**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;  
УдмФИЦ УРО РАН, Ижевск, Россия

**А. С. Хомутов**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**О. В. Муравьева**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;  
УдмФИЦ УРО РАН, Ижевск, Россия

**Е. А. Степанова**, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**В. Д. Попова**, студент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Исследовано влияние технологических операций на формирование остаточных напряжений при изготовлении цилиндров глубинно-штанговых насосов, изготовленных из марки стали 38Х2МЮА. Рассмотрены следующие операции: состояние поставки, отпуск, механическая обработка, ионное азотирование. Измеряемыми параметрами явились поперечные скорости ультразвуковых волн, используемые для расчетов изменений остаточных напряжений, которые определялись с использованием явления акустоупругости. Величина усредненных значений остаточных напряжений оценивалась разрушающим методом по методике завода-изготовителя разрезкой кольцевых образцов, вырезанных из труб после соответствующих технологических операций. Отмечена неоднородность остаточных напряжений по периметру трубы относительно среднего значения после всех технологических операций обработки изделия. По результатам исследований максимальные отклонения остаточных напряжений получены после операции азотирования. Из цилиндров изготовлены образцы-свидетели, с помощью которых проведена проверка твердости азотированного слоя и металлографический анализ микроструктуры азотированного слоя. Исследованная микроструктура состоит из перлита и феррита на первых 3-стадиях операций. После ионного азотирования микроструктура состоит из сорбитообразного азотистого перлита с включениями нитридов алюминия на глубине до 0,3 мм от внутренней поверхности. Микроструктура сердцевины феррито-перлитная, нормализованная, высокоотпущенная.*

*Проведенные исследования позволили выявить неоднородность остаточных напряжений по периметру трубы относительно среднего значения после всех технологических операций обработки изделия, достигающие 10 МПа; максимальные отклонения остаточных напряжений получены после операции азотирования и превышают 60 МПа; микроструктура в состоянии поставки после отпуска и механической обработки состоит из перлита и феррита; микроструктура после ионного азотирования состоит из сорбитообразного азотистого перлита с включениями нитридов алюминия. Твердость соответствует требованиям конструкторской документации.*

**Ключевые слова:** акустоупругость, скорость поперечных волн, остаточные напряжения, цилиндры глубинно-штанговых насосов, твердость, металлография.

### Введение

**П**огружные глубинно-штанговые насосы (ГШН) применяются при механизированной добыче нефти, их конструкция включает цилиндр и плунжер. В процессе производства цилиндр глубинно-штангового насоса подвергается различным циклам механической и химико-термической обработки, которые могут привести к образованию остаточных напряжений в стенках цилиндра, что повлияет на изменение геометрии, формы и появление дефектов [1].

В работах [2–4] проанализированы остаточные напряжения в поверхностных слоях металлических сплавов после ионного азотирования, исследована микроструктура и микротвердость коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т после ионного азотирования в различных средах. Отмечено повышение трещиностойкости азотированных образцов сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА, обработанных по режиму «закалка + высокий отпуск».

Проведенные в [5] исследования на сталях Х12МФ, 38ХМЮА, 30Х3Ф позволили получить

© Муравьев В. В., Хомутов А. С., Муравьева О. В., Степанова Е. А., Попова В. Д., 2024

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. № 586308).

зависимости влияния продолжительности азотирования при разных температурах на глубину азотированного слоя и необходимую твердость. Высокая твердость азотируемого слоя и увеличение объема за счет диффузии атомов азота в сталь приводят к появлению больших напряжений сжатия в азотированном слое (до 600 МПа), которые способствуют короблению деталей. В работах [6–8] изучено влияние локального ионного азотирования на структуру, фазовый состав и микротвердость конструкционной стали 38ХМЮА.

В [9] дан анализ физически возможных методов регистрации механического напряжения или гидростатического давления с помощью волоконных световодов и датчиков. Рассмотренный ультразвуковой метод контроля механических напряжений с использованием головных волн [10] позволил провести анализ факторов, оказывающих влияние на результат измерений механических напряжений, среди которых можно выделить скорость распространения головной ультразвуковой волны, температуру окружающей среды и объекта контроля, коэффициенты акустоупругой и термоакустической связей, параметры оптико-акустического преобразователя. Проведена оценка вклада каждого из этих факторов в результаты измерений механических напряжений.

Экспериментально показано с использованием явления акустоупругости [11–13] наличие анизотропии термоакустических коэффициентов поперечных волн для материалов, обладающих анизотропией. Научно обоснованы экспериментальные методы ультразвукового контроля механических напряжений, действующих в материале кольцеобразного образца при сжатии. Исследован процесс образования остаточного напряженно-деформированного состояния в трубах, подвергающихся пластическому изменению диаметральных размеров. Приведены результаты экспериментальных исследований релаксационной стойкости сталей после поверхностного механического упрочнения. Механическим нагружением кольца подшипника определен коэффициент акустоупругости продольной волны в стали ШХ15 и исследован натяг методом акустоупругости [14, 15]. Таким образом, исследование влияния технологических процессов изготовления цилиндра на их качество и формирование остаточных напряжений является одной из актуальных задач.

**Цель работы** – оценка неоднородности остаточных напряжений методом акустоупругости в цилиндрах глубинно-штанговых насосов по

окружности трубы после поставки и технологических операций изготовления: отпуска, шлифовки, ионного азотирования внутренней поверхности.

#### Объект исследований

Одним из основных элементов глубинно-штангового насоса является цилиндр (рис. 1).

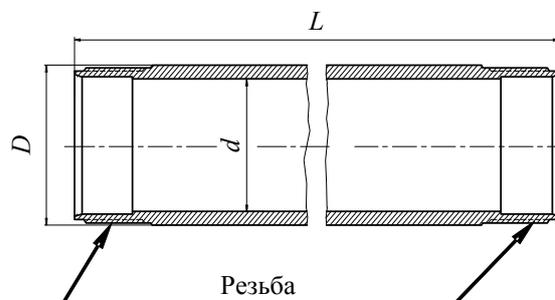


Рис. 1. Эскиз цилиндра глубинно-штангового насоса

Fig. 1. Sketch of the cylinder of a deep-rod pump

Соответствие цилиндра заданным характеристикам является важным условием для выполнения критериев работоспособности насоса и является определяющим фактором, влияющим на ресурс работы комплекса оборудования в целом. Внутренняя поверхность цилиндра ГШН упрочняется ионным азотированием, выполненным по запатентованной технологии «Способ ионно-плазменного азотирования длинномерной стальной детали» (Патент РФ № 2528537. 2014). Основные технические требования к цилиндру приведены в таблице 1.

Химический состав стали 38Х2МЮА в состоянии поставки приведен в таблице 2.

Исследования проводились на образцах-вырезках цилиндров глубинно-штангового насоса с размерами внешнего и внутреннего диаметров и длиной 40,75×31,75×450 мм, изготовленных из стали нитраллой 38Х2МЮА, после четырех стадий технологического процесса изготовления: поставка, операция отпуска, процесс шлифовки и ионное азотирование.

#### Методика измерения остаточных напряжений цилиндра

Оценка остаточных напряжений методом акустоупругости производилась согласно ГОСТ Р 52890–2007 «Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования». В основу метода заложена зависимость времени распространения ультразвуковых волн и внутренних напряжений, связанных через коэффициенты упругоакустической связи материала. Время распространения получено из анализа эхограмм многократных отражений

двух поперечных волн, поляризованных в ортогональных направлениях относительно толщины стенки цилиндра эхоимпульсным методом

при помощи бесконтактного электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразователя в составе структуроскопа СЭМА (рис. 2) [16, 17].

Таблица 1. Основные технические параметры цилиндра

Table 1. Main technical parameters of the cylinder

Размеры, механические свойства, микроструктура	Значения
Предел текучести основного материала	$\sigma_T \geq 480$ МПа
Остаточные напряжения	Не более 35 МПа
Прямолинейность	$\leq 0,125$ мм на 1500 мм
Внешний диаметр	40,75
Внутренний диаметр	$31,75 + 0,05$ мм
Максимальная разность размеров внутреннего диаметра	Не более 0,03 мм
Длина цилиндра	$4267 \pm 5$ мм
Шероховатость внутренней поверхности	Ra 0,32
Твердость основного материала	183...243 НВ
Твердость азотированного слоя на внутренней поверхности	Не менее 870 НВ
Твердость азотированного слоя на глубине 0,127 мм	Не менее 560 НВ
Глубина азотированного слоя	0,35...0,5 мм
Внешний вид	Отсутствие дефектов

Таблица 2. Химический состав материала цилиндра из стали 38Х2МЮА

Table 2. Chemical composition of cylinder material as delivered

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	T	Mo
0,38	0,35	0,27	0,009	0,010	1,41	0,09	0,2	0,805	0,006	0,16

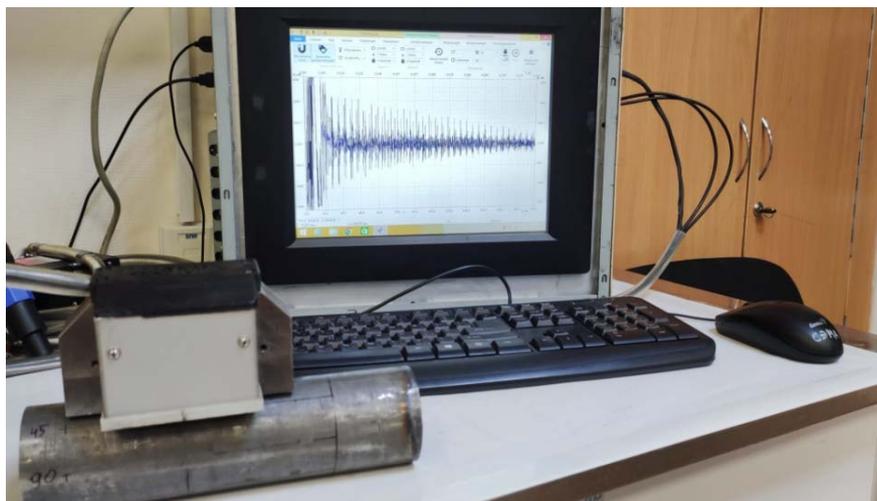


Рис. 2. Структуроскоп СЭМА, подключенный к компьютеру с ПО «ПРИНЦ»

Fig. 2. Structuroscope SEMA connected to a computer with "PRINCE" software

В процессе измерений ЭМА-преобразователь устанавливался на расстоянии 75 мм от торца образца цилиндра (рис. 3, а). В каждом сечении преобразователь перемещался с фиксацией в восьми точках по окружности цилиндра на угол  $\alpha$  от 0 до 360 град с шагом в 45 град (рис. 3, б). Две поперечные волны, распространяющиеся по толщине стенки трубы с поляризацией вдоль и поперек оси, позволяют оценить кольцевые напряжения относительно минимальных продольных.

Оценка остаточных напряжений методом акустоупругости проводилась по формуле

$$\sigma = K \left( \frac{t_1}{t_2} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент упругоакустической связи материала конструкции ( $K = -122$  ГПа, получен из эксперимента путем механического нагружения образца трубы в упругой области);  $t_1, t_2$  – время задержки импульса поперечной волны

с перпендикулярными векторами поляризации между первым и третьим отражениями, мкс.

Расчет процентных отклонений остаточных напряжений от средних значений производился по формуле

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma - \sigma_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{ср}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – значение остаточного напряжения в точке по окружности;  $\sigma_{\text{ср}}$  – рассчитанное среднее значение остаточных напряжений по восьми измерениям.

Полученные эхограммы обработаны в ПО «Принц». На рисунке 4 представлена эхограмма многократных отражений поперечных волн.

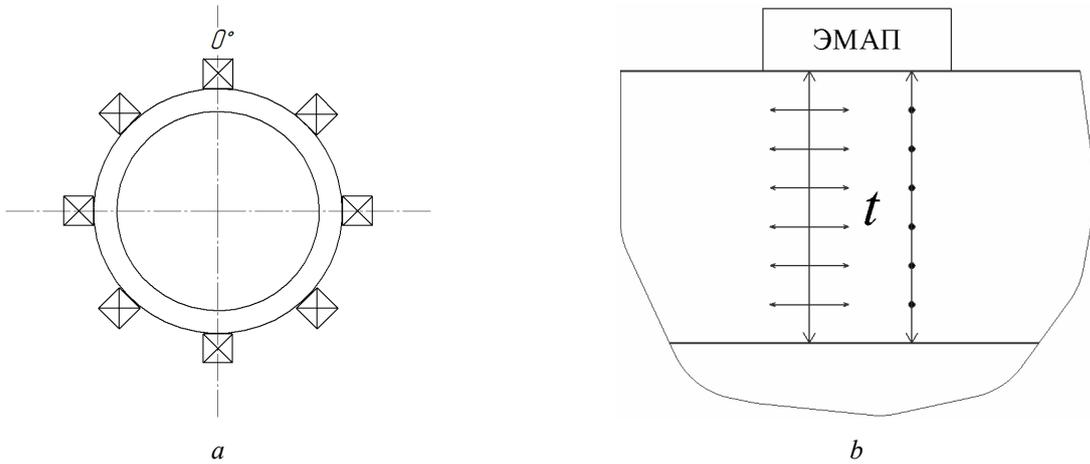


Рис. 3. Положение преобразователей по длине трубы (а) и по огибающей (b)

Fig. 3. Position of transducers along the length of the pipe (a) and along the envelope (b)

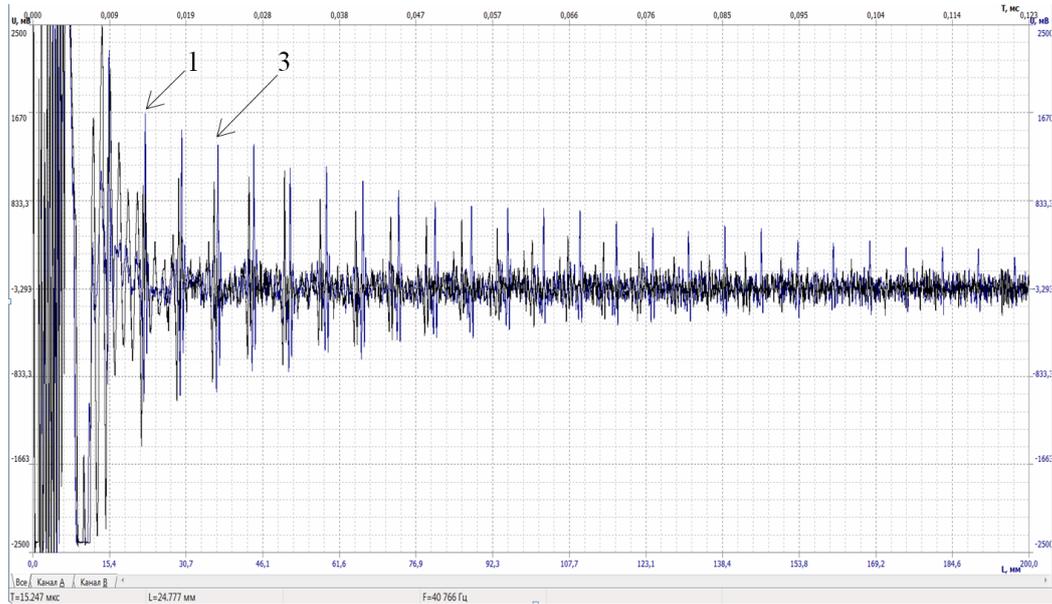


Рис. 4. Эхограмма многократных отражений поперечных волн (а), эхограмма многократных отражений продольной волны (b)

Fig. 4. Echogram of multiple reflections of transverse waves (a), echogram of multiple reflections of longitudinal waves (b)

Расчет скорости поперечной волны проводился с использованием формулы

$$C_{t,l} = \frac{dn}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $d$  – среднее значение толщины стенки цилиндра в месте установки преобразователя (погрешность определения 5 мкм);  $n$  – количество анализируемых отражений;  $\Delta t$  – время, соответствующее  $n$  отражениям.

Кроме ультразвуковых исследований контроль величины остаточных напряжений выполнялся по методике завода-изготовителя методом разрезки кольцевого образца, которая за-

ключается в измерении диаметра кольцевого образца высотой 10 мм до и после вырезки паза шириной 5 мм с учетом толщины стенки трубы (рис. 5).

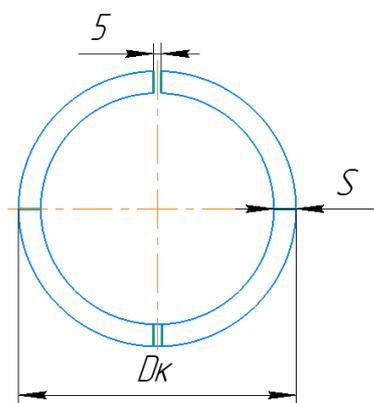


Рис. 5. Схема измерения диаметра (а) и вид кольцевого образца (b)  
 Fig. 5. Diameter measurement scheme (a) and type of annular sample (b)

Для начального диаметра  $D_0$ , конечного диаметра  $D_k$  и толщины стенки  $S$  находится среднее значение из трех измерений. Значение остаточных напряжений находится по формуле

$$\sigma_{oc} = \frac{E(D_0 - D_k)S}{(D_0 - S)^2}, \quad (5)$$

где  $E$  – модуль Юнга для стали 38Х2МЮА ( $E = 204$  ГПа);  $D_0$  – начальный диаметр, среднее значение, мм;  $D_k$  – конечный диаметр, среднее значение, мм;  $S$  – толщина стенки, среднее значение, мм.

Значение остаточных напряжений по требованиям завода не должно превышать 35 МПа.

Проверка структуры азотированного слоя проведена на микрошлифах, подготовленных по ГОСТ 1763–68. Микрошлифы выполнены на торцевых поверхностях образцов-свидетелей на плоскошлифовальном станке. После шлифования произведена полировка поверхности на полировальном станке до зеркального блеска.

Структура металла образца и азотированного слоя определена на микрошлифе, протравленном в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты ( $HNO_3$ ) с использованием микроскопа ММР-4 при увеличении  $\times 100$  и  $\times 1000$  [18–20].

Контроль глубины обезуглероженного слоя и структуры проводился также по ГОСТ 1763–68.

На полученных микрошлифах проведено измерение твердости азотированного слоя на микротвердометре ПМТ-3М методом вдавливания

четырёхгранной алмазной пирамиды при нагрузке 500 г на глубине 0,080 и 0,127 мм от края внутренней поверхности образца.

#### Результаты исследований остаточных напряжений

Результаты измерений средних значений остаточных напряжений разрушающим методом, проведенные на цилиндрах глубинно-штанговых насосов после поставки, операции отпуска, процесса шлифовки и ионного азотирования, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты анализа остаточных напряжений на образцах цилиндров

Table 3. Results of the analysis of residual stresses on cylinder samples

№ п/п	Операция	Остаточные напряжения, МПа
1	Заготовка	-31,6
2	Отпуск	+23,7
3	Механическая обработка	-23,7
4	Ионное азотирование	+63,2

Оценка локальных остаточных напряжений методом акустоупругости проведена на расстоянии 75 мм от торца вблизи места вырезки кольцевого образца ЭМА-преобразователем, который устанавливался в восьми точках через каждые 45 град по огибающей трубы. Полученные данные остаточных напряжений, рассчитанные по формулам (1) и (2), показывают их отклонения от значений, рассчитанных методом разрезки согласно таблице 3 (рис. 6).

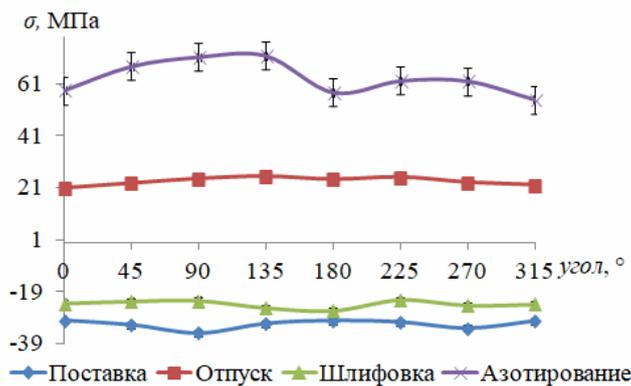


Рис. 6. Значения остаточных напряжений после 4 стадий технологического процесса изготовления на расстоянии 75 мм от торца  
 Fig. 6. Values of residual stresses after 4 stages of the manufacturing process at a distance of 75 mm from the end

Максимальные отклонения кольцевых остаточных напряжений в сторону растягивающих получены после операций термической обработки отпуска и азотирования. В качестве одной из причин неоднородности остаточных напряжений можно указать появление неоднородного упрочненного азотированного слоя после операции азотирования.

#### Металлография и твердость азотированного слоя

Для изучения свойств упрочненного слоя проведено металлографическое исследование микроструктуры и твердости в области азотированного слоя цилиндра глубинно-штангового насоса на образцах-свидетелях. Для контроля

азотированного слоя исследуемых цилиндров изготовлены образцы-свидетели. Глубина азотированного слоя по требованиям конструкторской документации (КД) должна быть в интервале 0,35...0,5 мм.

Твердость по Виккерсу согласно КД должна быть не менее 870 HV на глубине 0,080 мм и не менее 560 HV на глубине 0,127 мм. Результаты замера твердости на образцах представлены в таблице 4.

Таким образом, твердость соответствует требованиям конструкторской документации. Однако локальные замеры твердости не дают понимания о распределении остаточных напряжений в цилиндрах.

Таблица 4. Результаты замера твердости на образцах цилиндров

Table 4. Results of hardness measurements on cylinder samples

Твердость, HV	Твердость по КД на глубине 0,08 мм, не менее	Фактическая твердость на глубине 0,08 мм	Твердость по КД на глубине 0,127 мм, не менее	Фактическая твердость на глубине 0,127 мм
Образец после азотирования	870	875	560	757

Полученные результаты металлографического исследования микроструктуры образцов показали следующие результаты. После 4 технологических операций – микроструктура в состоянии поставки, после отпуска и механической обработки – состоит из перлита и феррита. Микроструктура после ионного азотирования состоит из сорбитообразного азотистого перлита и при увеличении  $\times 1000$  видны нитриды алюминия. Микроструктура сердцевины феррито-перлитная, нормализованная, высокоотпущенная (рис. 7).

Результаты металлографического исследования образцов цилиндров глубинно-штанго

вых насосов после проведения технологической операции упрочнения внутренней рабочей поверхности методом ионного азотирования показали наличие нештатных отклонений в микроструктуре образцов [21]. Появление упрочняющего слоя в результате длительной химико-термической обработки в течение 20...24 ч при температуре около 550 °С приводит к появлению растягивающих напряжений с неравномерностью по периметру предположительно вследствие неоднородности азотированного слоя, существенно превышающей требования КД.

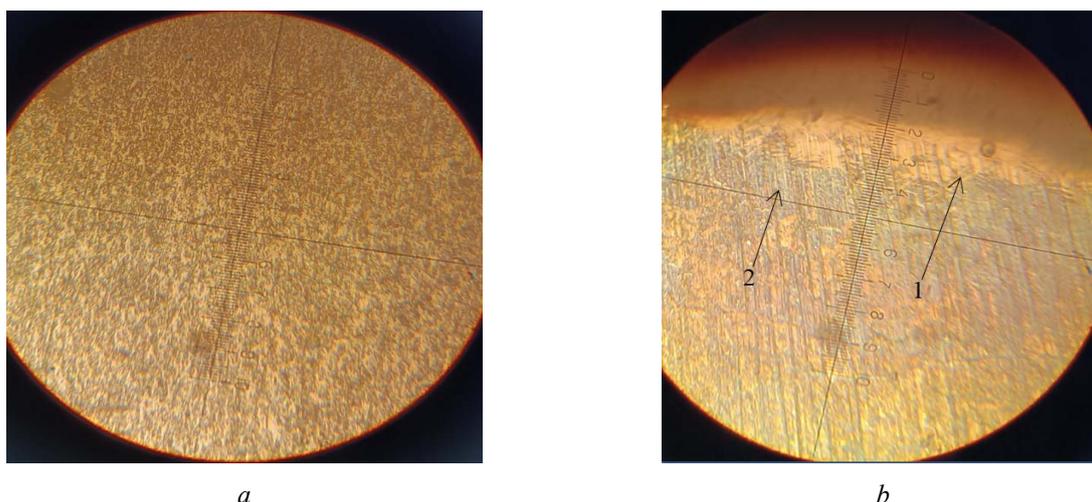


Рис. 7. Микроструктура в состоянии поставки, после отпуска и механической обработки состоит из перлита и феррита (а),  $\times 1000$ ; после ионного азотирования состоит из сорбитообразного азотистого перлита (1) с включениями нитридов алюминия (2), сердцевина феррито-перлитная, нормализованная, высокоотпущенная (b),  $\times 1000$

Fig. 7. The microstructure in the delivered state, after tempering and mechanical treatment, consists of pearlite and ferrite (a),  $\times 1000$ , after ion nitriding, it consists of sorbitol-like nitrogenous pearlite (1) with inclusions of aluminum nitrides (2), the core is ferrite-pearlite, normalized, highly tempered (b),  $\times 1000$

### Выводы

Проведенные исследования позволили выявить следующее.

- Отмечена неоднородность остаточных напряжений по периметру трубы относительно среднего значения после всех технологических операций обработки изделия, достигающих 10 МПа.

- По результатам исследований максимальные отклонения остаточных напряжений получены после операции азотирования и превышают 60 МПа.

- Микроструктура в состоянии поставки, после отпуска и механической обработки состоит из перлита и феррита.

- Микроструктура после ионного азотирования состоит из сорбитообразного азотистого перлита с включениями нитридов алюминия. Микроструктура сердцевины феррито-перлитная, нормализованная, высоко отпущенная.

- Твердость соответствует требованиям конструкторской документации.

### Библиографические ссылки

1. Хомутов А. С., Муравьев В. В. Выявление дефектов цилиндра глубинно-штангового насоса после ионного азотирования // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 16–26. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26

2. Особенности формирования остаточных напряжений в поверхностных слоях и покрытиях / С. Я. Бецофен, А. А. Лозован, В. С. Моисеев,

- С. С. Александрова, Н. А. Иванов, А. Н. Быкадоров // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 10. С. 30–40. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-10-30-40

3. Петрова Л. Г., Сергеева А. С. Поверхностное упрочнение коррозионноустойчивых сталей ионным азотированием в аммиачно-аргонной смеси // Технологии металлов. 2024. № 1. С. 10–15. DOI: 10.31044/1684-2499-2024-0-1-10-15

4. Загibalова Е. А., Москвина В. А., Майер Г. Г. Влияние метода и температуры ионно-плазменной обработки на физико-механические свойства поверхностных слоев в аустенитной нержавеющей стали // Frontier Materials & Technologies. 2021. № 4. С. 17–26. DOI: 10.18323/2782-4039-2021-4-17-26

5. Деметьев В. Б., Иванова Т. Н., Ломаева Т. В. Исследование процесса азотирования легированных сталей // Химическая физика и мезоскопия. 2020. Т. 22, № 3. С. 299-306. DOI: 10.15350/17270529.2020.3.29

6. Прохоров А. П., Баранова А. А. Перспективы развития процессов химико-термического упрочнения легированных сталей (обзорная информация) // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 70-2. С. 78–85. DOI: 10.18411/lj-02-2021-59

7. Особенности разрушения азотированных образцов сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА / А. В. Славин, А. А. Ляхов, А. А. Вишталюк, О. В. Кузьмина, И. В. Гулина, Н. О. Яковлев, А. В. Гриневич // Труды ВИАМ. 2021. № 9(103). С. 76–84. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-76-84

8. Хусаинов Ю. Г. Исследование структуры, фазового состава и механических свойств упрочненного слоя стали аустенитного класса при локальном ионном азотировании с эффектом полого катода // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18,

№ 8(212). С. 379–384. DOI: 10.36652/1813-1336-2022-18-8-379-384

9. Хлыбов А. А., Углов А. Л., Рябов Д. А. Об особенностях использования явления акустоупругости при контроле напряженного состояния анизотропного материала технических объектов при отрицательных температурах // Дефектоскопия. 2021. № 1. С. 23–32. DOI: 10.31857/S0130308221010036

10. Влияние поверхностного механического упрочнения на релаксационную стойкость сталей / Г. В. Мураткин, Д. А. Болдырев, Л. И. Попова, С. Г. Прасолов // Сталь. 2021. № 5. С. 33–35.

11. Кондратенко Л. А., Миронова Л. И. Остаточные напряжения при радиальной деформации стальных труб // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 70–76. DOI: 10.52261/02346206\_2022\_1\_70

12. Рыжова А. О., Бехер С. А., Попков А. А. Использование метода акустоупругости для контроля упругих механических напряжений в материале колец подшипников // Дефектоскопия. 2020. № 11. С. 28–37. DOI: 10.31857/S0130308220110032

13. Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, И. В. Булдакова // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 1. С. 42–52. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

14. Булдакова И. В., Волкова Л. В., Муравьев В. В. Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 1. С. 4–8. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-4-8

15. Рамазанов К. Н. Исследование влияния азотирования и высокотемпературного азотирования в тлеющем разряде с эффектом полого катода на фазовые превращения в конструкционных и инструментальных сталях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2008. Т. 10, № 1. С. 100–107.

16. Ионное азотирование высоколегированных конструкционных сталей с ультрамелкозернистой структурой при различных температурах / Р. С. Есипов, Р. А. Абдуллин, Ю. Г. Хусаинов, А. А. Николаев // Поверхность, рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2021. № 10. С. 102–107. DOI: 10.31857/S1028096021100058

17. Влияние условий азотирования конструкционных сталей на их эксплуатационные свойства и структурный метод оценки качества поверхностного слоя / Л. И. Куксенова, М. С. Алексеева, И. А. Хренникова, М. А. Гресс // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 4-1 (336). С. 163–171.

18. Структура и свойства поверхностного слоя высокохромистой аустенитной стали, подвергнутой ионно-плазменному азотированию / Ю. Ф. Иванов, Е. А. Петрикова, С. В. Лыков, Ю. А. Денисова, А. Д. Тересов, О. С. Толкачев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и нано-

материалов. 2020. № 12. С. 805–815. DOI: 10.26456/rcascnn/2020.12.805

19. Современное состояние методов и средств регистрации высоких температур и механических напряжений в конструкциях / М. И. Беловолов, С. О. Козельская, О. Н. Будадин, В. Ю. Кутюрин // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23, № 8(266). С. 30–43. DOI: 10.14489/td.2020.08.pp.030-043

20. Методика оценки неопределенности измерений механических напряжений ультразвуковым методом с помощью оптико-акустического раздельно-совмещенного преобразователя / А. В. Федоров, В. А. Быченко, И. В. Беркутов, И. Е. Алифанова // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 7. С. 56–61. DOI: 10.14489/td.2021.07.pp.056-061

21. Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований механических напряжений при сжатии кольцеобразного образца / И. Е. Алифанова, А. В. Федоров, И. Ю. Кинжагулов, В. А. Быченко, И. В. Беркутов // Приборы. 2022. № 12(270). С. 22–26.

## References

1. Khomutov A.S., Murav'ev V.V. (2023) [Flaw detection in the deep-rod pump cylinder after ion nitriding]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 21, no. 2, pp. 16-26 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26

2. Betsofen S.Ya., Lozovan A.A., Moiseev V.S., Aleksandrova S.S., Ivanov N.A., Bykadorov A.N. (2023) [Features of formation of residual stresses in surface layers and coatings]. *Rossijskaja Metallurgija (Metally)*, no. 10, pp. 30-40 (in Russ.). DOI: 10.31044/1814-4632-2023-10-30-40

3. Petrova L.G., Sergeeva A.S. (2024) [Surface hardening of corrosion-resistant steels by ion nitriding in ammonia-argon mixture]. *Rossijskaja Metallurgija (Metally)*, no. 1, pp. 10-15 (in Russ.). DOI: 10.31044/1684-2499-2024-0-1-10-15

4. Zagibalova E.A., Moskvina V.A., Mayer G.G. (2021) [The influence of method and temperature of ion-plasma treatment on physical and mechanical properties of surface layers in austenitic stainless steel]. *Peredovye materialy i tehnologii*, no. 4, pp. 17-26 (in Russ.). DOI: 10.18323/2782-4039-2021-4-17-26

5. Demytyev V.B., Ivanova T.N., Lomaeva T.V. (2020) [Study of the nitriding process of alloy steels]. *Himicheskaja fizika i mezoskopiya*, vol. 22, no. 3, pp. 299-306 (in Russ.). DOI: 10.15350/17270529.2020.3.29

6. Prokhorov A.P., Baranova A.A. (2021) [Prospects for the development of processes of chemical-thermal hardening of alloy steels]. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovanija*, no. 70-2, pp. 78-85 (in Russ.). DOI: 10.18411/lj-02-2021-59

7. Slavin A.V., Lyakhov A.A., Vishtalyuk A.A., Kuzmina O.V., Gulina I.V., Yakovlev N.O., Grinevich A.V. (2021) [Features of destruction of nitrided samples of 38H2MYUA and 30H3MA steels]. *Trudy VIAM*, no. 9, pp. 76-84 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-76-84

8. Khusainov Yu.G. (2022) [Study of structure, phase composition and mechanical properties of hardened layer of austenitic steel during local ion nitriding with hollow cathode effect]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, vol. 18, no. 8, pp. 379-384 (in Russ.). DOI: 10.36652/1813-1336-2022-18-8-379-384
9. Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A. (2021) [On the specific features of using the phenomenon of acoustoelasticity when testing the stress state of anisotropic material of technical objects at subzero temperatures]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 1, pp. 23-32 (in Russ.). DOI: 10.31857/S0130308221010036
10. Muratkin G.V., Boldyrev D.A., Popova L.I., Prasolov S.G. (2021) [Influence of surface mechanical hardening upon the relaxation resistance of steel]. *Steel*, no. 5, pp. 33-35 (in Russ.).
11. Kondratenko L.A., Mironova L.I. (2022) [Residual Stresses During Radial Deformation Of Steel Tubes]. *Problemy inzhenerii i avtomatizacii*, no. 1, pp. 70-76 (in Russ.). DOI: 10.52261/02346206\_2022\_1\_70
12. Ryzhova A.O., Bekher S.A., Popkov A.A. (2020) [Using the method of acoustoelasticity for evaluating elastic mechanical stresses in the material of bearing rings]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 11, pp. 28-37 (in Russ.). DOI: 10.31857/S0130308220110032
13. Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Buldakova I.V. (2019) [Device and methods for measuring of acoustic anisotropy and the residual stress in the main gas pipelines' metal]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, vol. 10, no. 1, pp. 42-52 (in Russ.). DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52
14. Buldakova I.V., Volkova L.V., Murav'ev V.V. (2020) [Stress distribution in pipe samples of gas pipelines with welded joints]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, vol. 18, no. 1, pp. 4-8 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-4-8
15. Ramazanov K.N. (2008) [Research of influence of nitriding and high-temperature nitriding in the glow discharge with the effect of the hollow cathode on phase transformations in constructional and tool steels]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 10, no. 1, pp. 100-107 (in Russ.).
16. Esipov R.S., Abdullin R.A., Husainov Yu.G., Nikolaev A.A. (2021) [Ionic nitroging of high-alloy structural steels with ultrafine-grained structure at different temperatures]. *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhronnyye i neytronnnyye issledovaniya*, no. 10, pp. 102-107 (in Russ.). DOI: 10.31857/S1028096021100058
17. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Chrennikova I.A., Gress M.A. (2019) [The effect of nitriding conditions on structural steels on their performance properties and structural method for assessing the quality of the surface layer]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*, no. 4-1, pp. 163-171 (in Russ.).
18. Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Lykov S.V., Denisova Ju.A., Tolkachev O.S. (2020) [Structure and properties of the surface layer high chrome austenitic steel, submitted to ion-plasma nitrogen]. *Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*, no. 12, pp. 805-815 (in Russ.). DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.805
19. Belovolov M.I., Kozelskaya S.O., Budadin O.N., Kuturyn V.Yu. (2020) [Current state of methods and means of registration of high temperatures and mechanical stresses in structures]. *Testing. Diagnostics*, vol. 23, no. 8, pp. 30-43. DOI: 10.14489/td.2020.08.pp.030-043
20. Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V., Alifanova I.E. (2021) [Methodology for evaluation the uncertainty of measurement of mechanical stress by the ultrasonic method with the help of an optical-acoustic separate-combined transducer]. *Testing. Diagnostics*, vol. 24, no. 7, pp. 56-61 (in Russ.). DOI: 10.14489/td.2021.07.pp.056-061
21. Alifanova I.E., Fedorov A.V., Kinzhagulov I.Yu., Bychenok V.A., Berkutov I.V. (2022) [Comparison of the Results of Experimental and Theoretical Studies of Mechanical Stress During Compression of a Ring-Shaped Sample A]. *Pribory*, no. 12, pp. 22-26 (in Russ.).

### Formation of Residual Stresses in the Cylinders of Deep-Rod Pumps after Manufacturing Operations

V.V. Murav'ev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU; Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

A.S. Khomutov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

O.V. Murav'eva, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU; Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

E.A. Stepanova, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.D. Popova, Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The influence of technological operations on the formation of residual stresses during the manufacture of cylinders of deep-rod pumps made of steel grade 38X2MUA has been studied. The following operations are considered: delivery status, tempering, mechanical processing, ion nitriding. The measured parameters were the transverse velocities of ultrasonic waves, used to calculate changes in residual stresses, which were determined using the phenomenon of acoustoelasticity. The magnitude of the average values of residual stresses was assessed by the destructive method according to the manufacturer's method by cutting ring samples cut from pipes after the corresponding technological operations. The heterogeneity of residual stresses along the perimeter of the pipe relative to the average value after all technological operations of processing the product was noted. According to the research results, the maximum deviations of residual stresses were obtained after the nitriding operation. Witness samples were made from the cylinders, with the help of which the hardness of the nitrided layer was checked and metallographic analysis of the microstruc-*

ture of the nitrated layer was carried out. The studied microstructure consists of pearlite and ferrite at the first 3 stages of operations; after ion nitriding, the microstructure consists of sorbitol-like nitrogenous pearlite with inclusions of aluminum nitrides at a depth of up to 0.3 mm from the inner surface. The microstructure of the core is ferrite-pearlite, normalized, highly tempered.

The conducted research revealed the following. The heterogeneity of residual stresses along the perimeter of the pipe relative to the average value after all technological operations of processing the product, reaching 10 MPa, was noted; the maximum deviations of residual stresses were obtained after the nitriding operation and exceed 60 MPa; the microstructure in the delivered state after tempering and machining consists of pearlite and ferrite; the microstructure after ion nitriding consists of sorbitol-like nitrogenous pearlite with inclusions of aluminum nitrides. Hardness meets the requirements of design documentation.

**Keywords:** acoustoelasticity, transverse wave velocities, residual stresses, cylinders of deep-rod pumps, hardness, metallography.

Получено 13.05.2024

#### Образец цитирования

Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 2. С. 87–96. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96

#### For Citation

Murav'ev V.V., Khomutov A.S., Murav'eva O.V., Stepanova E.A., Popova V.D. (2024) [Formation of Residual Stresses in the Cylinders of Deep-Rod Pumps after Manufacturing Operations]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 2, pp. 87-96 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96