

В. В. МУРАВЬЕВ, *д-р техн. наук, проф.*

А. С. ХОМУТОВ

М. А. СИНЦОВ, *канд. техн. наук*

Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова
(Ижевск, Россия)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА СКОРОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН И ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРАХ ГЛУБИННО-ШТАНГОВЫХ НАСОСОВ

Аннотация

Исследовано влияние технологических операций изготовления цилиндров глубинно-штанговых насосов на скорости поперечных, продольных и рэлеевских волн и формирование остаточных напряжений. Измерения проведены после операций состояния поставки, отпуска, механической обработки, ионного азотирования. Для оценки остаточных напряжений по периметру и по длине трубы использовали метод акустоупругости. Отмечена неоднородность остаточных напряжений по периметру и по длине трубы после всех технологических операций.

Ключевые слова: скорости продольных, поперечных и рэлеевских волн, структуроскопия, остаточные напряжения, акустоупругость.

Введение. Структура металла и остаточные напряжения деталей машин и конструкций изменяются при изготовлении в результате механических и температурных воздействий. Перспективные варианты неразрушающей оценки изменения структурного и прочностного состояния металлоконструкций связаны с измерением чувствительных информативных параметров ультразвуковых волн. Установление связи между информативными параметрами ультразвуковых волн и структурно-механическим состоянием металла является актуальной научно-технической задачей в области акустической структуроскопии, решение которой позволит повысить качество металла деталей машин и конструкций и обеспечит их долговечность.

Среди информативных параметров ультразвуковых волн для оценки структурного состояния металла целесообразно использовать наиболее структурно чувствительные – скорости продольных, поперечных и рэлеевских волн. Следует отметить, что существующие методы акустической структуроскопии, по сравнению с другими (визуальные, магнитные, вихретоковые), обладают такими преимуществами, как возможность оценки упругих модулей и структурного состояния, как на поверхности, так и по всему объему изделия, а также возможность структуроскопии изделий в процессе эксплуатации.

Глубинно-штанговые насосы (ГШН) широко применяются в нефтяной промышленности для механизированной добычи нефти. В процессе производства цилиндр глубинно-штангового насоса подвергается различным циклам механико-термической обработки и упрочнению внутренней поверхности азотированием, которые могут привести к образованию остаточных напряжений в стенках цилиндра, что повлияет на изменение геометрии, формы и появление дефектов.

Цель работы: оценка неоднородности остаточных напряжений и скорости волн в цилиндрах глубинно-штанговых насосов по длине и по окружности трубы.

Объекты и методы исследований остаточных напряжений. Для оценки скорости поперечных и рэлеевских волн, остаточных напряжений, коэффициента Пуассона металла цилиндров ГШН использованы бесконтактный электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь и структуроскоп электромагнитно-акустический СЭМА, для оценки скорости продольных волн – локальный преобразователь из гибкой поливинилденфторидной пленки и дефектоскоп DIO-1000 РА.

Исследования остаточных напряжений проводились на образцах цилиндров с размерами внешнего и внутреннего диаметров и длиной 57,64х43,65х4450 мм, изготовленных из стали 38ХМЮА, после четырех стадий технологического процесса изготовления: поставка, операция отпуска, процесс шлифовки и ионное азотирование. В процессе измерений преобразователь устанавливался на расстоянии 50, 210 и 370 см от торца цилиндра. В каждом сечении преобразователь перемещался по окружности цилиндра на угол α от 0° до 360° с шагом в 45° (рис. 1). Полученные эхограммы обработаны в ПО «Принц» и ПО Mathcad.

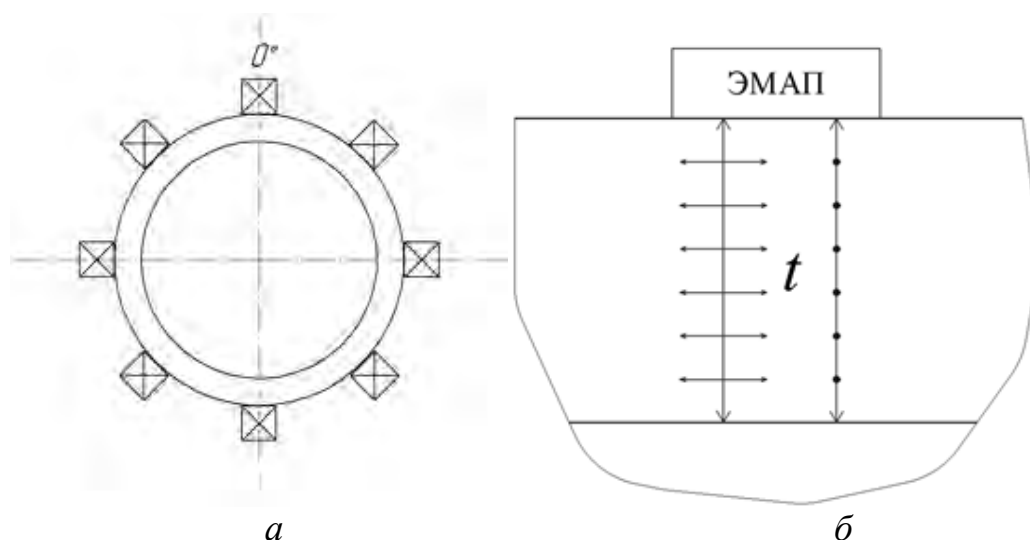


Рис. 1. Положение преобразователей по огибающей трубы (а), распространение волн по толщине стенки трубы (б)

Оценка остаточных напряжений проведена 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 произведен по формуле

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

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

В результате экспериментальных исследований наблюдаются отклонения остаточных напряжений (рис. 2а) и коэффициента Пуассона (рис. 2б) на всех стадиях технологического процесса.

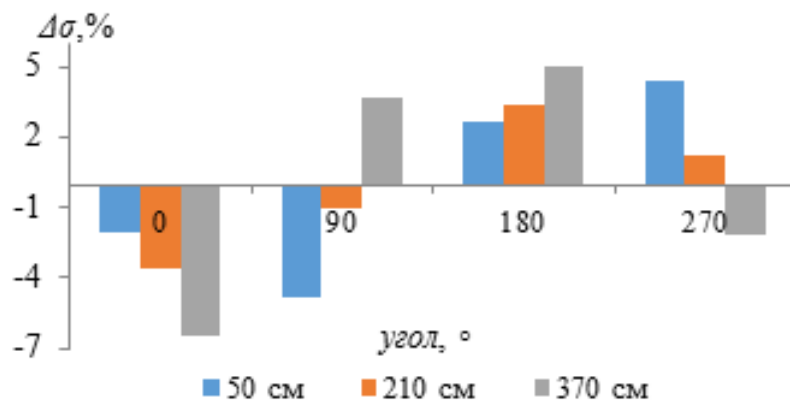


Рис. 2а. Отклонения остаточных напряжений по периметру и по длине труб (поставка)

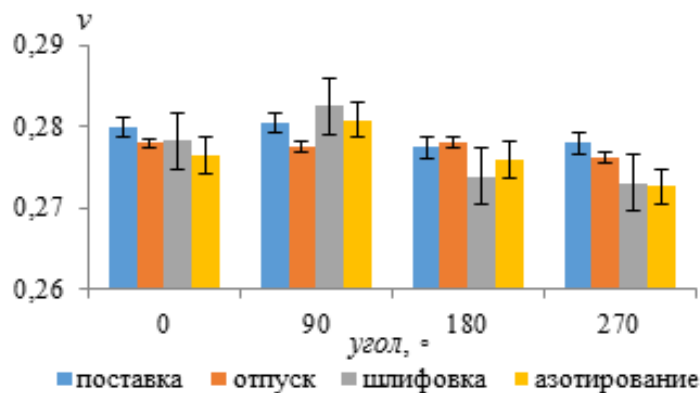


Рис. 2б. Изменения коэффициента Пуассона по периметру труб после разных операций

Максимальные отклонения остаточных напряжений получены после операции шлифовки, минимальные отклонения после операции отпуска.

Коэффициент Пуассона равномерен по окружности после операции отпуска и неравномерен после шлифовки. Максимальное значение коэффициента Пуассона наблюдается после операции шлифовки – 0,296, минимальное значение после азотирования – 0,286. Отклонения остаточных напряжений по периметру и по длине цилиндра наблюдается на всех стадиях технологического процесса.

Структуроскопия с использованием рэлеевских волн. Для апробирования методики структуроскопии с использованием рэлеевских волн исследована партия из 32 труб-заготовок ГШН, длиной 4450 мм, наружным диаметром 57,64 мм и внутренним диаметром 43,65мм. Все образцы подвергались измерениям на каждом этапе технологического процесса производства: в состоянии поставки, после правки прямолинейности и отпуска при температуре 580°С, после ионного азотирования внутренней поверхности трубы-заготовки цилиндра при температуре 530°С в течение 15 часов.

Для прозвучивания трубы-заготовки разработан специально адаптированный ЭМА преобразователь, обеспечивающий бесконтактное возбуждение и прием рэлеевских волн, распространяющихся по огибающей поверхности трубы, как в прямом, так и в обратном направлении. Для перемещения и позиционирования ЭМА преобразователя на трубе-заготовке спроектирована и разработана подвижная платформа, позволяющая проводить быстрое позиционирование и плавное сканирование с использованием структуроскопа СЭМА (рис. 3).

Для расчета статистических данных использовано программное обеспечение «ПРИНЦ» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2015662211).

Методика структуроскопии труб с помощью рэлеевских волн реализована на многократной тени с использованием ЭМА преобразователей со специальными системами подмагничивания, обеспечивающих возбуждение и прием волн в прямом и обратном направлениях по окружности сечения трубы (рис. 4).

Скорости распространения рэлеевских волн рассчитываются с учетом времени распространения волн по сечению образцов и измеренных диаметров

$$C_r = \frac{\pi \cdot d \cdot m}{t_{n+m} - t_n}, \quad (3)$$

где $(t_{n+m} - t_n)$ – время между $(n+m)$ и m импульсами, n – количество переотражений на диаметре цилиндра; d – диаметр цилиндра.

Преимуществом рэлеевских волн является то, что сканирование производится только по образующей трубы, что обеспечивает высокую

скорость сканирования по сравнению с другими типами волн, которые требуют сканирования всего тела заготовки.

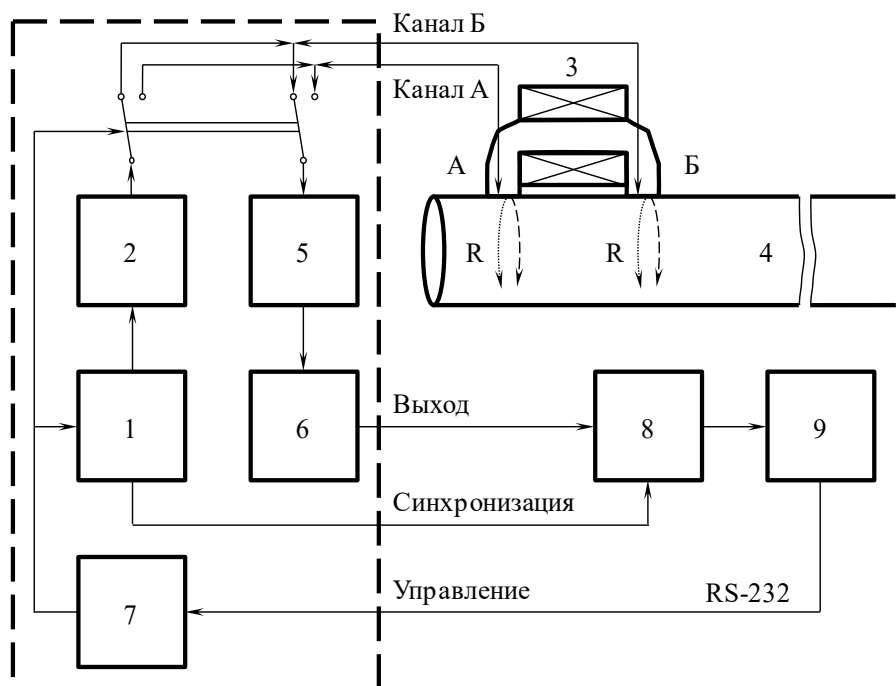


Рис. 3. Структурная схема установки с ЭМА преобразователем рэлеевских волн: 1 – генератор синхроимпульсов, 2 – генератор зондирующих импульсов, 3 – накладной двухканальный ЭМА преобразователь с роботизированной подвижной платформой, 4 – исследуемый образец заготовки, 5 – полосовой фильтр, 6 – высокочастотный усилитель, 7 – плата управления генератором синхроимпульсов и каналами, 8 – аналого-цифровой преобразователь, 9 – персональный компьютер

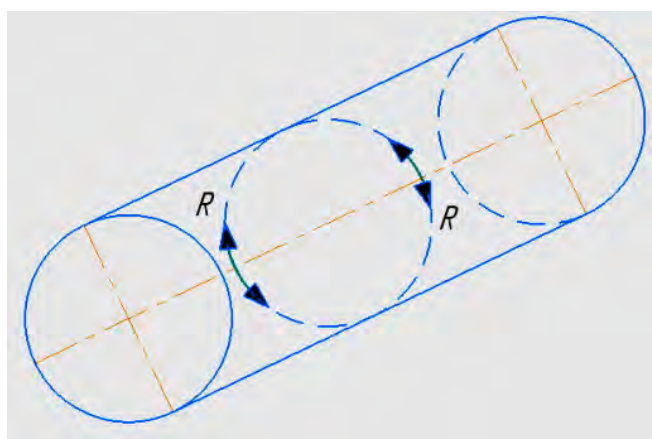


Рис. 4. Ход рэлеевских волн по окружности цилиндра ГШН

Измерения параметров рэлеевских волн производились в состоянии поставки, после термообработки (отжига) и после азотирования внутритрубного поверхностного слоя (рис. 5).

Полученные данные свидетельствуют о наличии зависимости скорости распространения рэлеевских волн от термообработки и структурного состояния труб. Скорость ультразвуковой волны на трубах-заготовках глубинных штанговых насосов стабильна и составляет 2990 м/с, а после отпуска растет на 25 м/с и достигает значений 3015 м/с.

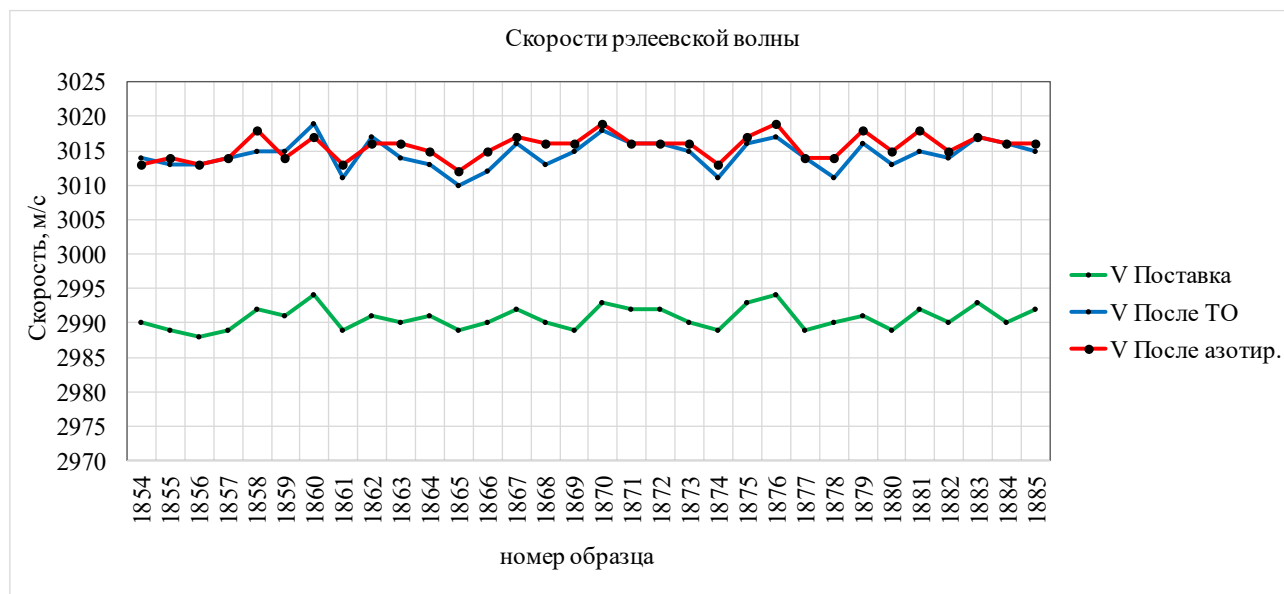


Рис. 5. Скорости рэлеевских волн в цилиндрах после технологических операций

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252 с использованием уникальной научной установки УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Контакты:

vmuraviev@mail.ru (Муравьев Виталий Васильевич);

Aleksey.Khomutov@rimera.com (Хомутов Сергей Александрович);

omtc11@mail.ru (Синцов Максим Анатольевич).