

# ДРЕЙФ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВОПРОВОДОВ COMMON RAIL ПРИ НАРАБОТКЕ

## DRIFT OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMMON RAIL FUEL LINES DURING OPERATING TIME

**В.О. СВЕЩИНСКИЙ**, к.т.н.

Алтайский завод прецизионных изделий, Барнаул,  
Россия, sveschinsky@yandex.ru

**V.O. SVESHCHINSKIY**, PhD in Engineering

Altai factory of precision products, Barnaul, Russia,  
sveschinsky@yandex.ru

В процессе эксплуатации стальных трубопроводов происходит изменение, дрейф, характеристик материалов, из которых они изготовлены. В области технологических трубопроводов и трубопроводов нефтегазового комплекса этому вопросу посвящена обширная литература, включающая как научные публикации, так и нормативные государственные и отраслевые документы. Изменение характеристик материала топливопроводов высокого давления двигателей внутреннего сгорания не привлекало внимания специалистов. Топливопроводы были важным компонентом двигателей, но при том уровне давлений впрыска, материалах и технологиях, определяющих, в том числе, стоимость компонента в общей стоимости двигателя, они оставались вне зоны особого внимания. Развитие в России собственного производства систем типа Common Rail делает необходимым изучение поведения деталей в условиях длительного нагружения внутренним гидравлическим давлением уровня 1600 кг/см<sup>2</sup> и выше. Дрейф характеристик материалов топливопроводов высокого давления может иметь большое значение с точки зрения надежности топливной системы и двигателя в целом. Впервые проведены исследования механических характеристик стальных бесшовных труб при различной наработке на безмоторном стенде при нагружении внутренним гидравлическим давлением 1600 кг/см<sup>2</sup> с частотой пульсаций 45–55 Гц. Установлено, что при наработке увеличивается твердость в поперечных сечениях топливопроводов. Также увеличивается стандартное отклонение значений твердости, то есть разброс значений. Характер изменения предела прочности и предела текучести при наработке свыше 1100 ч требует дополнительных исследований. Сделан вывод о необходимости проведения испытаний большего количества образцов на двигателе для выяснения предельных значений механических характеристик материала.

*Ключевые слова:* механические характеристики, твердость, топливопроводы высокого давления, техническое состояние.

During the operation of steel pipelines, there is a change, drift, in the characteristics of the materials from which they are made. In the field of technological pipelines and oil and gas complex pipelines, an extensive literature is devoted to this issue, including both scientific publications and regulatory state and industry documents. Changes in the material characteristics of high pressure fuel lines of internal combustion engines did not attract the attention of specialists. Fuel lines were an important component of engines, but at that injection pressure level, materials and technologies, which determine, inter alia, the cost of a component in the total cost of the engine, they remained outside the area of special attention. The development in Russia of its own production of Common Rail systems makes it necessary to study the behavior of parts under conditions of prolonged loading with an internal hydraulic pressure of 1600 kg/cm<sup>2</sup> and higher. The drift of the characteristics of the materials of the high pressure fuel lines can be of great importance, in terms of the reliability of the fuel system and the whole engine. For the first time, studies were carried out of the mechanical characteristics of seamless steel pipes at various operating times on a non-motorized test bench under loading with an internal hydraulic pressure of 1600 kg/cm<sup>2</sup> with a pulsation frequency of 45–55 Hz. It has been established that during running hours, the hardness in the cross sections of the fuel lines increases. The standard deviation of hardness values also increases, i.e. the spread of values is present. The nature of the change in the tensile strength and yield strength with an operating time of more than 1100 hours requires additional research. It is concluded that it is necessary to test a larger number of samples on the engine to find out the limiting values of the mechanical characteristics of the material.

*Keywords:* mechanical characteristics, hardness, high pressure fuel lines, technical condition.

## Введение

Известно, что в процессе эксплуатации стальных трубопроводов происходит изменение, дрейф, характеристик материалов. Существует обширная литература, посвященная этой проблеме у труб нефте-газотранспортного комплекса и технологических трубопроводов, в частности [2, 3, 5–10].

В отношении топливопроводов высокого давления (далее – ТВД) систем Common Rail ситуация пока несколько иная. Производство систем Common Rail в России только начинает развиваться. При этом информации о поведении материалов, длительное время находящихся под давлением 1600 кг/см<sup>2</sup> и более, явно недостаточно.

Необходимость в такой информации есть. С одной стороны, это связано со все более ужесточающимися требованиями к двигателям и их топливным системам. С другой стороны, необходимость в такой информации обусловлена развитием отечественных систем подачи топлива под давлением 1600 кг/см<sup>2</sup> и более. Уже сегодня ведутся опытно-конструкторские работы по созданию отечественных систем с давлениями впрыска топлива 1800 кг/см<sup>2</sup> и выше.

Системы Common Rail получают все большее распространение в современных двигателях: по некоторым оценкам, около 80 % автомобильных двигателей комплектуются топливной аппаратурой этого типа. В России после принятия экологических норм уровня EURO-IV повышение давления впрыска, реализуемое, главным образом, в системах типа Common Rail, стало основным путем развития топливной аппаратуры дизельных двигателей.

До сих пор предпринимались отдельные попытки изучения свойств материалов топливопроводов, работающих в условиях циклического нагружения внутренним гидравлическим давлением. Отдельные результаты таких исследований ТВД, изготовленных из стальной бесшовной трубы китайского производства (сталь St52), изложены, в частности, в работе В.О. Свещинского и др. [11].

## Цель исследования

Определение характера изменения во времени предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и твердости в поперечном сечении топливопроводов высокого давления при длительном нагружении внутренним гидравлическим давлением 1600 кг/см<sup>2</sup>.

## Материалы и методы

### Объект изучения

Топливопроводы высокого давления топливоподающей системы аккумуляторного типа, изготовленные из стальных бесшовных труб размерности 8×вн.3 производства российского предприятия ОАО «Первоуральский новотрубный завод» (далее – ОАО «ПНТЗ») [4].

В технических условиях [4] на трубы производства ОАО «ПНТЗ» для топливопроводов высокого давления марка материала не указывается. Это вполне соответствует общемировому тренду: в международном стандарте ISO 8535-1:2016 и российском государственном стандарте [1] марки материала труб не указываются, а регламентируются лишь свойства проката. Химический состав материала, из которого были изготовлены трубы, приведен в таблице 1.

Ранее были проведены предварительные исследования поведения материала ТВД под нагрузкой для труб производства компании Jiangsusheng zhangjia gangfuren he gaojingguan Co., Ltd. Результаты кратко изложены в работе [11].

### Порядок проведения работ

Из труб одной партии поставки изготовили и замаркировали три заготовки. От каждой заготовки отрезали образец для определения механических свойств и твердости в поперечных сечениях. Из оставшихся труб изготовили три топливопровода, которые установили на безмоторный стенд для обкатки компонентов топливных систем типа Common Rail: насосов высокого давления и форсунок. Описание экспериментальной установки кратко дано в работе [11].

Таблица 1

Химический состав материала труб

Химический элемент	C	P	S	Cr	Mo
Содержание, %	0,13	0,009	0,005	2,10	0,96

ТВД снимали с испытаний поочередно. Нароботка топливопроводов составила:

- образец № 1 – 1103 часа;
- образец № 2 – 1520 часов;
- образец № 3 – 540 часов.

Для каждого образца определяли пределы прочности, текучести, относительное удлинение и твердости в поперечном сечении.

Пределы прочности, текучести, относительное удлинение измеряли на универсальной разрывной машине Instron 3369 в АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

Твердость  $HV_{0,1}$  измеряли на микротвердомере SHIMADZU HMV-G21DT в нескольких поперечных сечениях образцов до и после наработки на окружностях двух радиусов: R2 мм и R3,5 мм. На каждой окружности твердость измеряли в восьми равнорасположенных точках. Контрольные сечения располагали на прямых участках трубы, чтобы исключить возможные искажения из-за влияния перераспределения твердости при гибке.

Кроме того, для труб в состоянии поставки (перед установкой на стенд) и после наработки 540 часов определяли микроструктуру материала.

Все образцы были поставлены на стенд одновременно. При общем начале отсчета наработки фактически для каждого образца существовало два момента для измерения характеристик материала: момент перед установкой (труба в состоянии поставки) и момент после снятия при конкретной наработке. Это обстоятельство, строго говоря, позволяет оценивать только один временной промежуток – одно значение наработки – для каждого образца, то есть график имеет только две точки. Распространяя выводы на все значения наработок, можно получить, с некоторой погрешностью, закономерность изменения характеристик в пределах наибольшей достигнутой наработки.

## Результаты и обсуждение

### *Изменение микроструктуры материала*

В состоянии поставки трубы имели сорбитно-перлитную микроструктуру балла 8 (рис. 1), после наработки микроструктура стала преимущественно сорбитной балл 8 (рис. 2 и 3).

### *Изменение пределов прочности и текучести*

В табл. 2 представлены результаты изменений предела прочности, предела текучести и относительного удлинения образцов при различной наработке.

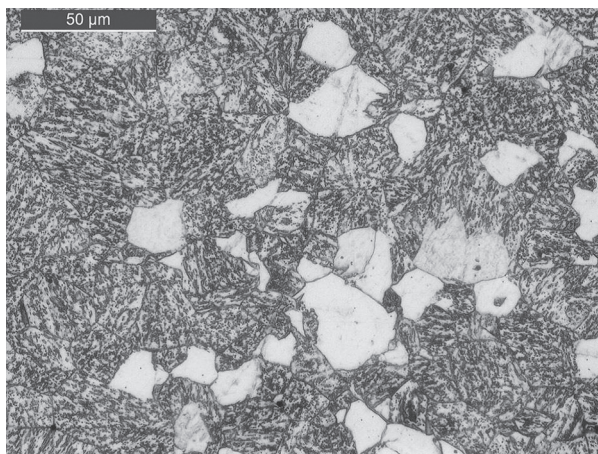


Рис. 1. Микроструктура материала трубы в состоянии поставки

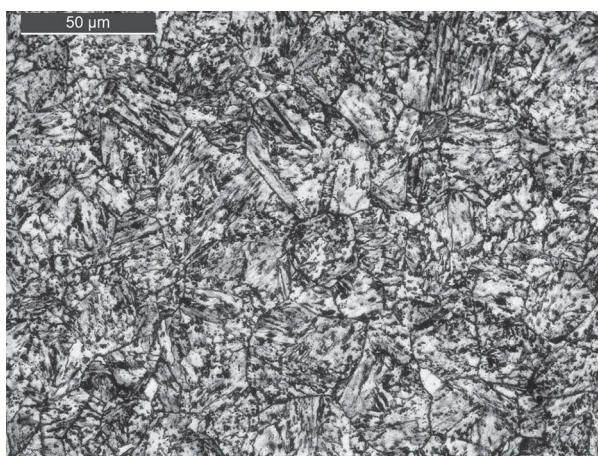


Рис. 2. Микроструктура материала трубы после наработки 540 часов

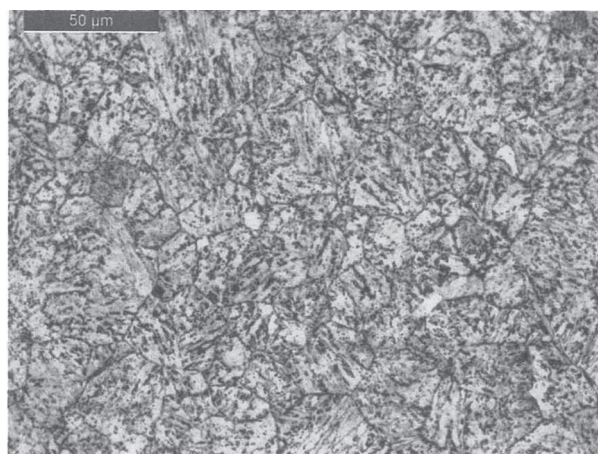


Рис. 3. Микроструктура материала трубы после наработки 1103 часа

### *Изменение твердости в поперечном сечении*

В табл. 3 представлены результаты испытания твердости в поперечных сечениях топливопроводов на радиусе R2 мм.

В табл. 4 представлены результаты испытания твердости в поперечных сечениях то-

Таблица 2

## Изменение механических свойств материалов

Наработка, ч	0	540	1103	1520
Предел прочности, МПа	749	737	686	686
Предел текучести, МПа	523	509	476,3	539
Относительное удлинение, %	24,3	23	20	26
Коэффициент пластичности	0,70	0,69	0,69	0,79

Таблица 3

## Твердость на радиусе R2 мм

Точка испытания твердости	образец №1		образец №2		образец №3	
	0 ч	1103 ч	0 ч	1520 ч	0 ч	540 ч
1	245,5	253	238	279	236	259
2	244,5	252	232,5	270	237	259
3	252,5	266	231	268	227	235
4	240	261	237	281	232	273
5	246	266	230	265	235	235
6	244,5	250	236	268	235	269
7	250,5	248	236	268	235	278
8	246	257	231	273	232	250
Среднее	246,19	256,63	233,94	271,5	233,69	257,25
Стандартное отклонение	3,54	4,24	4,28	5,73	5,88	16,32

пливопроводов на радиусах R3,5 мм, соответственно.

Поведение материала трубы при длительном нагружении внутренним гидравлическим давлением 1600 кг/см<sup>2</sup> имеет особенности, которые могут быть объяснены только путем дополнительных исследований. К таким особенностям относится, в частности, харак-

тер изменения механических характеристик. До уровня наработки 1103 ч наблюдается монотонное уменьшение значений всех характеристик. При этом фиксируется уменьшение и коэффициента пластичности. Условно это можно трактовать, как разупрочнение трубы. Известно, что в нефтегазовом комплексе нормируется предельное значение коэффициен-

Таблица 4

## Твердость на радиусе R3,5 мм

Точка испытания твердости	образец №1		образец №2		образец №3	
	0 ч	1103 ч	0 ч	1520 ч	0 ч	540 ч
1	250	245	227	265	228	268
2	244,5	279	232,5	270	229,5	266
3	245	243	231	264	229,5	259
4	239	267	229,5	284	227,5	262
5	252,5	250	234	261	235	264
6	245,5	253	236,5	276	227,5	260
7	247,5	280	228,5	269	227,5	267
8	242,5	253	231,5	265	230	261
Среднее	245,81	258,75	231,31	269,25	229,31	263,38
Стандартное отклонение	5,66	14,68	3,97	7,52	3,86	3,38

та пластичности. Ранее считалось, что «отношение предела текучести к временному сопротивлению должно быть не больше 0,75 для углеродистых сталей, 0,8 – для низколегированных, 0,85 – для термически упрочненной стали» [12]. В настоящее время, в соответствии с руководящими документами ПАО «ГАЗПРОМ», для класса материалов, близкого к сталям, из которых изготавливаются ТВД, коэффициент пластичности не должен превышать 0,9.

В ходе испытаний отмечено незначительное уменьшение коэффициента пластичности до наработки 1103 ч, но затем наблюдается резкое увеличение за счет роста предела текучести при сохранении неизменным предела прочности. Это обстоятельство пока трудно объяснить.

Испытания твердости в поперечном сечении образцов хорошо демонстрируют фактический разброс характеристик холоднодеформированных стальных бесшовных труб, в том числе в состоянии поставки. Для испытаний были взяты трубы одной партии поставки, изготовленные из заготовок одной плавки по единой технологии на одном и том же оборудовании. Тем не менее, видно, что разброс значений твердости при нулевой наработке, то есть в состоянии поставки трубы, не только существует, но и имеет различное стандартное отклонение для всех образцов.

При наработке наблюдается увеличение твердости в поперечных сечениях ТВД. Это хорошо заметно по изменению уровней средней по сечению твердости.

Общим для образцов оказалось увеличение с ростом наработки значений стандартного отклонения твердости от среднего по сечениям. Этот результат противоречит данным, полученным при испытаниях топливопроводов из стали St52 [11]. Нельзя также считать, что для испытывавшихся топливопроводов подтвердился вывод, сделанный в работе [11], о большем выравнивании твердости на радиусе R2 мм, по сравнению с радиусом R3,5 мм. При наработке 540 ч стандартное отклонение твердости на радиусе R3,5 мм почти в 4 раза меньше, чем на радиусе R2 мм. Это обстоятельство может быть связано с неравномерностью механических свойств не только в поперечных, но и в продольных сечениях трубы.

В ходе испытаний все образцы сохранили герметичность, случаев разрушения не было.

Образцы снимались с испытаний при достижении разности в наработке  $\approx 500$  ч.

Это обстоятельство, наряду с значением коэффициента пластичности при наработке 1520 ч, говорит о том, что в условиях безмоторного стенда стальные бесшовные трубы размерности 8×вн.3 производства ОАО «ПНТЗ» из материала, имеющего химический состав по табл. 1, выдерживают длительную работу при давлении 1600 кг/см<sup>2</sup>. Насколько можно судить по данным испытаний одного образца, наработка 1520 ч не является предельной для данных труб. Безусловно, для большей обоснованности такого вывода, необходимо проведение длительных испытаний, во-первых, на двигателе и, во-вторых, расширенной выборкой – при большем числе образцов. Это также будет полезно для определения предельных значений механических характеристик материалов.

### Заключение

Выводы по результатам проведенных работ носят предварительный характер, однако намекают направления дальнейших исследований.

### Литература

1. ГОСТ Р ИСО 8535-1-2017. Двигатели дизельные. Стальные трубы для топливопроводов высокого давления. Часть 1. Требования к бесшовным холоднодеформируемым трубам. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.
2. СТО Газпром 2-2.3-095-2007. Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов. М., 2007.
3. ОСТ 153-39.4-010-2002. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений. М., 2002. 110 с.
4. ТУ 24.20.13.140-388-00186619-2017. Трубы стальные бесшовные высокого давления для топливопроводов двигателей внутреннего сгорания. Технические условия. Первоуральск: ОАО «ПНТЗ», 2017. 12 с.
5. Брюшко В.И. Оценка состояния металла магистральных и технологических трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 2006. 149 с.
6. Кузьбожев А.С. Материаловедческие критерии оценки надежности металла, методы прогнозирования ресурса газотранспортных систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2008. 46 с.
7. Мирошниченко С.В. Дисперсия твердости заготовки, как критерий оптимальности накопленной

- деформации // Физика и техника высоких давлений. 2005. Том 15. № 4. С. 72–75.
8. Михалев А.Ю. Разработка метода оценки остаточного ресурса основного металла труб нефтегазопроводов на основе измерения твердости с малой нагрузкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2012. 23 с.
  9. Пояркова Е.В., Кузеев Е.Р. Макромасштабные уровни диагностики механического состояния металла высокотемпературных трубопроводов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое Дело». 2015. № 4. С. 283–312.
  10. Сафарова К.Н. Структурно-энергетическое состояние основного материала сварных труб газопроводов и долговечность // Всероссийская научно-техническая конференция студентов Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии. URL: [http://studvesna.ru/db\\_files/articles/572/thesis.pdf](http://studvesna.ru/db_files/articles/572/thesis.pdf).
  11. Свещинский В.О. и др. Некоторые предварительные результаты исследования влияния многоциклового нагружения на твердость топливопровода высокого давления // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 2. С. 54–58.
  12. Алиев Р.А. и др. Трубопроводный транспорт нефти и газа: учеб. для вузов М.: Недра, 1988. 368 с.
- tekh. nauk [Assessment of the state of metal of main and technological pipelines: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Tol'yatti, 2006. 149 p.
6. Kuz'bozhev A.S. Materialovedcheskie kriterii ocenki nadezhnosti metalla, metody prognozirovaniya resursa gazotransportnyh sistem: avtoref. dis. ... dokt. tekh. nauk [Material science criteria for assessing the reliability of metal, methods for predicting the resource of gas transmission systems: Abstract for Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Moscow, 2008. 46 p.
  7. Miroschnichenko S.V. Hardness dispersion of the workpiece as a criterion for the optimality of the accumulated deformation. Fizika i tekhnika vysokih davlenij. 2005. Vol. 15. No 4, pp. 72–75 (in Russ.).
  8. Mihalev A.YU. Razrabotka metoda ocenki ostatochnogo resursa osnovnogo metalla trub neftegazoprovodov na osnove izmereniya tverdosti s maloj nagruzkoj: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a method for assessing the residual resource of the base metal of oil and gas pipelines based on measurements of hardness with a low load: Abstract for Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Uhta, 2012, 23 p.
  9. Poyarkova E.V., Kuzeev E.R. Macro-scale levels of diagnostics of the mechanical state of metal in high-temperature pipelines. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe Delo». 2015. No 4, pp. 283–312 (in Russ.).
  10. Safarova K.N. Structural and energy state of the main material of welded pipes of gas pipelines and durability. Vse-rossijskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov Studencheskaya nauchnaya vesna 2012: Mashinostroitel'nye tekhnologii [All-Russian Scientific and Technical Conference of Students. Student Scientific Spring 2012: Engineering Technologies] (in Russ.). URL: [http://studvesna.ru/db\\_files/articles/572/thesis.pdf](http://studvesna.ru/db_files/articles/572/thesis.pdf).
  11. Sveshchinskij V.O. i dr. Some preliminary results of the study of the influence of a multi-cycle load on the hardness of a high pressure fuel line. Traktory i sel'hoz mashiny. 2018. No 2, pp. 54–58 (in Russ.).
  12. Aliev R.A. i dr. Truboprovodnyj transport nef'ti i gaza [Pipeline transport of oil and gas]: Ucheb. dlya vuzov. Moscow: Nedra Publ., 1988. 368 p.

## References

1. GOST R ISO 8535-1-2017. Diesel engines. Steel pipes for high pressure fuel lines. Part 1. Requirements for seamless cold forming pipes. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 16 p.
2. STO Gazprom 2-2.3-095-2007. Guidelines for the diagnostic examination of the linear part of gas pipelines. Publ., Moscow, 2007.
3. OST 153-39.4-010-2002. Methodology for determining the residual life of oil and gas pipelines and pipelines of head structures. Moscow, 2002. 110 p.
4. TU 24.20.13.140-388-00186619-2017. Seamless high-pressure steel pipes for fuel lines of internal combustion engines. Technical conditions. Perovoural'sk: OAO «PNTZ» Publ., 2017. 12 p.
5. Bryushko V.I. Ocenka sostoyaniya metalla magistral'nyh i tekhnologicheskikh truboprovodov: dis. ... kand.

*Автор выражает благодарность инженеру-исследователю И.С. Шахуриной и начальнику центра исследований и разработок ОАО «ПНТЗ» А.В. Серебрякову за помощь в проведении работ.*