

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МНОГОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА ТВЕРДОСТЬ ТОПЛИВОПРОВОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

PRELIMINARY RESULTS OF THE STUDY OF THE EFFECT OF A MULTI-CYCLE LOAD ON THE HARDNESS OF A HIGH-PRESSURE FUEL PIPE

В.О. СВЕЩИНСКИЙ, к.т.н.
С.П. БОБРОВ
И.С. ТЕРЕЩЕНКО

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

V.O. SVESHCHINSKIY, PhD in Engineering
S.P. BOBROV
I.S. TERESHCHENKO

Altai precision components plant, Barnaul, Russia,
sveschinsky@yandex.ru

Проведено исследование влияния внутреннего давления на распределение твердости в стенке топливopовода. В контурах высокого давления систем Common Rail давление топлива намного превышает уровень давления в традиционных топливных системах. Вследствие этого представляет практический интерес изменение механических свойств материалов деталей в процессе эксплуатации. В настоящей работе была сделана попытка оценки влияния многоцикловой нагрузки топливopовода высоким внутренним давлением на твердость материала, из которого был изготовлен топливopовод. Нагружение осуществляли в условиях безмоторного испытательного стенда давлением дизельным топливом под давлением 160 МПа. Продолжительность испытаний составляла 500 часов. При выбранных частоте вращения вала насоса и частоте срабатывания клапанов электрогидроуправляемых форсунок это было эквивалентно примерно 96x10⁶ циклов. Перед испытаниями и по их завершению были произведены измерения твердости в поперечном сечении топливopоводов. Получены распределения значений твердости, свидетельствующие о существовании – в данных условиях нагружения – процесса самоупрочнения материала. В исходном состоянии топливopоводы характеризуются некоторой анизотропией твердости и, соответственно, прочностных характеристик. При этом неоднородность поля значений твердости уменьшается с уменьшением радиуса расположения слоя материала. Рассеяние значений твердости имеет место как вдоль оси топливopовода, так и в окружном направлении. Нагружение топливopоводов системы типа Common Rail пульсирующим гидравлическим давлением приводит к перераспределению значений твердости в стенке топливopоводов. Обнаружено, что в слоях материала, расположенных ближе к центральному каналу топливopовода, выравнивание твердости, по мере наработки, происходит в большей степени, чем в слоях, удаленных от центрального канала. В целом происходит повышение твердости, что можно трактовать, как упрочнение топливopовода при работе.

Ключевые слова: твердость, труба, сечение, наработка.

Investigation of the effect of internal pressure on the distribution of hardness in the fuel pipe wall was conducted. In the high pressure circuits of Common Rail systems, the fuel pressure is much higher than the pressure level in conventional fuel systems. That is why it is of practical interest to change the mechanical properties of the component materials during operation. In the present work, an attempt was made to evaluate the influence of the multi-cycle loading of the fuel pipe with a high internal pressure on the hardness of the material from which the fuel line was made. The loading was carried out under the conditions of a non-motorized test bench with a pressure of diesel fuel of 160 MPa. The test duration was 500 hours. With the selected pump shaft speed and the response frequency of the electrohydraulic control valves this was equivalent to approximately 96x10⁶ cycles. Before and after the tests, hardness measurements were made in the cross section of the fuel lines. The distributions of hardness values are obtained, which testify the existence, under the given loading conditions of a self-hardening process of the material. In the initial state, fuel lines are characterized by a certain anisotropy of hardness and, accordingly, strength characteristics. In this case, the inhomogeneity of the field of values of hardness decreases with decreasing radius of location of the material layer. Dispersion of hardness values takes place both along the axis of the fuel pipe and in the circumferential direction. Loading of fuel pipes of the Common Rail type with pulsating hydraulic pressure leads to a redistribution of the hardness values in the fuel pipe wall. It is found that in the layers of material located closer to the central channel of the fuel pipe, the hardness equalization occurs to a greater extent as it is used, than in layers located far from the central channel. In general, the hardness is increased, which can be interpreted as the hardening of the fuel line during operation.

Keywords: hardness, pipe, cross section, result.

Введение

Исследования российских и иностранных специалистов подтверждают наличие остаточных напряжений в прокатных профилях [1], в том числе в тонкостенных стальных трубах [2]. В основе технологии изготовления тонкостенных и толстостенных холоднодеформированных стальных труб лежит общий принцип многократного волочения, поэтому можно предположить, что в толстостенных стальных бесшовных трубах существуют остаточные напряжения. Эти напряжения обусловлены, в том числе, поверхностным пластическим деформированием как на этапе изготовления проката – при волочении, так и на этапе изготовления конечного изделия – при посадке соединительных головок и гибочных операциях.

Определение остаточных напряжений является актуальной, но сложной задачей [3]. Методы обнаружения, измерения и анализа остаточных напряжений подробно описаны в литературе [1, 4–9]. Во многих случаях обнаружение и измерение остаточных напряжений требуют наличия специального, весьма дорогостоящего, оборудования. В то же время известен относительно простой метод экспресс-анализа напряженного состояния детали, называемый методом твердости. Этот метод позволяет сделать качественную оценку напряженного состояния детали в конкретном сечении [8].

Интерес к распределению твердости в сечениях деталей у многих специалистов объясняется существованием взаимосвязи между твердостью и напряжениями, в частности остаточными напряжениями. Твердость как универсальная характеристика материала детали использована для анализа стальных трубопроводов, в частности, в работе Е.В. Пояркова и И.Р. Кузеева [6]. Было показано, что картина распределения твердости по сечению детали позволяет оценить неоднородность механических характеристик материала как косвенное отражение напряженного состояния.

Развитие отечественных конструкций топливных систем типа Common Rail приводит к необходимости решения многих технических задач, связанных, в том числе, с проектированием, производством и эксплуатацией топливопроводов высокого давления. Представляет практический интерес, в частности, изменение механических характеристик, например твердости в процессе эксплуатации.

Цель исследования

Целью исследования является оценка влияния многоциклового нагружения стальной бесшовной трубы топливопровода высокого давления внутренним давлением при знакопостоянном асимметричном цикле на твердость материала.

Материалы и методы исследований

Исследования были проведены для бесшовных труб размерности Ш8Чвн.3, изготовленных из стали типа St52. Фактический химический состав стали (набор легирующих элементов) приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали трубы

| Химический элемент | C | Si | Mn | P | S |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Содержание, % | 0,220 | 0,550 | 1,600 | 0,035 | 0,035 |

Из трубы были изготовлены два топливопровода, установлены накидные гайки и высажены соединительные головки с уплотнительным профилем.

Твердость измеряли на микротвердомере SHIMADZU HMV-G21DT в нескольких поперечных сечениях образцов до и после наработки на окружностях двух радиусов: R2 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.

Образец топливопровода высокого давления был установлен на безмоторный стенд для обкатки компонентов топливных систем типа Common Rail – насосов высокого давления и форсунок. Топливопровод соединял топливный аккумулятор высокого давления и электроуправляемую форсунку. Одновременно на стенде обкатывалось 4 форсунки. Частота вращения вала топливного насоса высокого давления составляла 3200 мин⁻¹, частота срабатываний электромагнитных клапанов форсунок была установлена равной частоте вращения вала насоса, то есть за один оборот происходило по одному впрыску каждой форсункой. Системное давление топлива в аккумуляторе составляло 160 МПа на всем протяжении испытаний. Общий вид топливной аппаратуры, установленной на стенде, показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид топливной аппаратуры, установленной на стенде. На переднем плане – длинные опытные топливопровода высокого давления

Чистая наработка составила 500 часов.

В данной работе не принимали во внимание возникновение и существование иных колебаний давления в топливопроводе, чем волны разрежения, возникающие при впрыске форсункой. Нагружение топливопровода рассматривали, как событие, инициируемое только впрыском топлива форсункой. Поэтому количество циклов нагружения считали равным количеству впрысков за время наработки. За 500 часов работы стенда количество циклов нагружения составило около $96 \cdot 10^6$. Это позволяет оценивать проведенное нагружение топливопровода как многоцикловое.

Результаты измерений твердости в поперечных сечениях топливопроводов до и после наработки приведены на рис. 2.

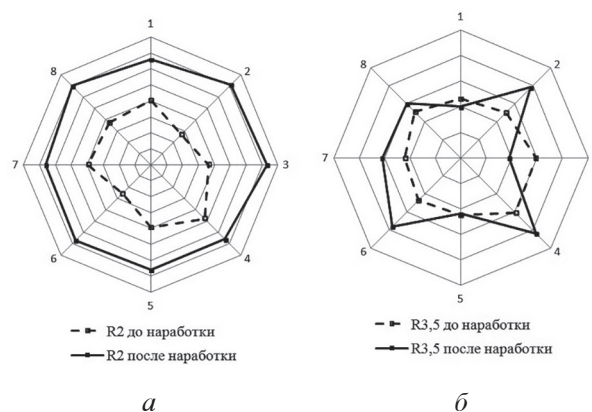


Рис. 2. Изменение твердости в поперечном сечении топливопроводов высокого давления на радиусе R2 мм (а) и R3,5 мм (б) (средние значения)

Так как твердость измеряли в нескольких сечениях, были получены массивы значений, иллюстрирующие неоднородность свойств материала топливопровода как вдоль его оси, так и в окружном направлении. Результаты количественной оценки рассеяния значений твердости приведены в табл. 2 и 3.

Обсуждение результатов

В исходном состоянии топливопроводы характеризуются некоторой анизотропией прочностных характеристик, поскольку твердость, безусловно, относится именно к прочностным характеристикам материала. При этом наблюдается рассеяние значений твердости как вдоль оси топливопровода, так и в окружном направлении.

Таблица 2

Результаты измерений твердости HV_1 на окружности радиуса R2 мм

| № | до установки на стенд | | | | после наработки 500 ч | | | |
|------------------------------------|------------------------|--------|-----|----------|------------------------|-----|-----|----------|
| | результаты по сечениям | | | | результаты по сечениям | | | |
| | среднее | min | max | σ | среднее | min | max | σ |
| 1 | 200,25 | 188 | 209 | 9,71 | 213 | 209 | 217 | 4,62 |
| 2 | 193,5 | 178 | 223 | 20,17 | 215,5 | 209 | 222 | 7,51 |
| 3 | 198,25 | 182 | 225 | 18,64 | 216,5 | 213 | 220 | 4,04 |
| 4 | 204 | 188 | 221 | 13,54 | 213 | 205 | 221 | 9,24 |
| 5 | 199,75 | 188 | 224 | 16,42 | 213 | 208 | 218 | 5,77 |
| 6 | 192,75 | 184 | 202 | 9,57 | 213,5 | 208 | 219 | 6,35 |
| 7 | 199,75 | 180 | 214 | 14,38 | 213 | 207 | 219 | 6,93 |
| 8 | 198,5 | 190 | 212 | 9,47 | 215 | 212 | 218 | 3,46 |
| результаты по точкам на окружности | среднее | | | 13,99 | 213 | | | 5,99 |
| | min | 192,75 | | | | | | |
| | max | 204 | | | 216,5 | | | |
| | σ | 3,67 | | | 1,40 | | | |

Таблица 3

Результаты измерений твердости HV_1 на окружности радиуса R3,5 мм

| № | до установки на стенд | | | | после наработки 500 ч | | | |
|------------------------------------|------------------------|--------|-----|----------|------------------------|-----|-----|----------|
| | результаты по сечениям | | | | результаты по сечениям | | | |
| | среднее | min | max | σ | среднее | min | max | σ |
| 1 | 206,5 | 198 | 211 | 5,80 | 205 | 200 | 210 | 5,77 |
| 2 | 207,5 | 198 | 222 | 10,21 | 214,5 | 204 | 225 | 12,12 |
| 3 | 209,75 | 200 | 233 | 15,76 | 204,5 | 196 | 213 | 9,81 |
| 4 | 210,25 | 198 | 221 | 10,28 | 216 | 208 | 224 | 9,24 |
| 5 | 206,25 | 192 | 225 | 15,20 | 206 | 200 | 212 | 6,93 |
| 6 | 206,75 | 196 | 216 | 9,78 | 214 | 209 | 219 | 5,77 |
| 7 | 206 | 190 | 234 | 20,33 | 210,5 | 206 | 215 | 5,20 |
| 8 | 207,75 | 197 | 222 | 10,90 | 210 | 204 | 216 | 6,93 |
| результаты по точкам на окружности | среднее | | | 12,28 | | | | 7,72 |
| | min | 206 | | | 204,5 | | | |
| | max | 210,25 | | | 216 | | | |
| | σ | 4,25 | | | 11,5 | | | |

При работе двигателя топливопроводы высокого давления нагружены пульсирующим внутренним гидравлическим давлением. Как показывают полученные результаты, чем ближе к центральному каналу топливопровода расположены слои материала, тем в большей степени происходит выравнивание в них твердости и, как можно предположить, других прочностных характеристик.

Если оценивать рассеяние по такому распространенному статистическому показателю, как стандартное отклонение случайной величины, то видно, что для слоя, расположенного на радиусе R2 мм, эта величина уменьшилась после наработки в окружном направлении почти в 2,5 раза и почти в 2 раза в среднем по сечениям. Этот результат на качественном уровне не противоречит известным методам уменьшения остаточных напряжений, описанных в литературе, в частности, в работах [7, 10].

В слое, расположенном на радиусе R3,5 мм, также происходит увеличение неоднородности материала. Величина стандартного отклонения значений твердости, замеренных после нагружения топливопровода на стенде, снижается в меньшей степени, чем на радиусе R2 мм. При этом степень рассеяния на радиусе R3,5 мм выше, чем на радиусе R2 мм, как для исходного состояния образца, так и для состояния после нагружения.

Если интерпретировать повышение твердости как упрочнение материала можно констатировать некоторое упрочнение топливопровода в течение первых 500 часов работы.

Зафиксированные случаи меньших значений твердости на образце после нагружения на

стенде, чем на исходном образце, могут быть связаны, в том числе, с исходной неоднородностью материала образцов.

Выводы

1. Нагружение топливопроводов, связывающих аккумулятор и форсунки топливной системы типа Common Rail, пульсирующим гидравлическим давлением во время работы приводит к перераспределению значений твердости в стенке топливопроводов.

2. Неоднородность поля значений твердости уменьшается с уменьшением радиуса расположения слоя материала.

3. В целом происходит повышение твердости, что можно трактовать как упрочнение топливопровода при работе.

4. Для получения дополнительной информации о состоянии материала после более длительной наработки – соизмеримой с ресурсными значениями – целесообразно провести соответствующие испытания.

Литература

1. Иванов А.П., Кирьязева Л.П. Экспериментально-аналитическое определение полей остаточных напряжений в прокатных двутаврах // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2012. № 36. С. 377–382.
2. Шимов Г.В., Серебряков А.В., Серебряков А.В., Розенбаум М.А. Исследование полей остаточных напряжений в осеботонкостенных трубах из нержавеющей стали после волочения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2016. Т. 16. № 2. С. 127–132.
3. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Полетаева А.Ю. Деформативность металлов при опреде-

лении технологических остаточных напряжений в трубах // Вестник ПНИПУ. Механика. 2012. № 1. С. 43–49.

4. Тарасов Ю.Л., Хвесьюк О.В. Распределение напряжений в стенках трубопроводов при коррозионных повреждениях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1 (3). С. 702–706.
5. Рудаченко А.В., Саруев А.Л. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов. Томск: Издательство политехнического университета, 2011. 136 с.
6. Пояркова Е.В., Кузеев И.Р. Макромасштабные уровни диагностики механического состояния металла высокотемпературных трубопроводов // Нефтегазовое Дѣло. Электронный научный журн. 2015. № 4. Режим доступа: <http://ogbus.ru>. (дата обращения: 04.10.2016).
7. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989. 254 с.
8. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург: Издательство Уральского государственного университета, 2015. 248 с.
9. Буркин С. П., Логинов Ю. Н., Тропотов А. В. и др. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках // Достижения в теории и практике трубного производства: материалы 1-й Российской конференции по трубному производству «Трубы России-2004», [Екатеринбург, 10–12 марта 2004 г.]. Екатеринбург: Издательство Уральского государственного технического университета, 2004. С. 87–97.
10. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Способ снятия растягивающих остаточных напряжений на поверхности металлических изделий: патент на изобретение № 2458155, Российская Федерация. Опубликовано 10.08.2012. Бюл. № 22.
3. Kolmogorov G.L, Kuznetsova E.V., Poletaeva A.Yu. Metal deformability in determining technological residual stresses in pipes. Vestnik PNIPIU. Mekhanika. 2012. No 1, pp. 43–49 (in Russ.).
4. Tarasov Yu.L., Khvesyuk O.V. Distribution of stresses in the walls of pipelines in case of corrosion damage. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2011. Vol. 13. No 1 (3), pp. 702–706 (in Russ.).
5. Rudachenko A.V., Saruev A.L. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov [Investigations of the stress-strain state of pipelines]. Tomsk: Izdatel'stvo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2011. 136 p.
6. Poyarkova E.V., Kuzeev I.R. Macro-scale levels of diagnostics of the mechanical state of metal of high-temperature pipelines. Neftgazovoe Dѣlo. Elektronnyy nauchnyy zhurn. 2015. No 4 (in Russ.). URL: <http://ogbus.ru>. (accessed: 04.10.2016).
7. Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh [Control of residual stresses in metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1989. 254 p.
8. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii [Residual stresses in metal products]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2015. 248 p.
9. Burkin S. P., Loginov Yu. N., Tropotov A. V. i dr. Analysis of methods for determining and eliminating residual stresses in tube billets. Dostizheniya v teorii i praktike trubnogo proizvodstva: materialy 1-y Rossiyskoy konferentsii po trubnomu proizvodstvu «Truby Rossii-2004» [Achievements in the theory and practice of pipe production: materials of the 1st Russian Conference on Pipe Production «Pipes of Russia-2004»], [Ekaterinburg, 10–12 marta 2004 g.]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta Publ., 2004, pp. 87–97 (in Russ.).
10. Ivanov D.A., Zasukhin O.N. Sposob snyatiya rastyagivayushchikh ostatochnykh napryazheniy na poverkhnosti metallicheskich izdeliy [Method for removing tensile residual stresses on the surface of metal products]: patent na izobretenie No 2458155, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 10.08.2012. Byul. No 22.

References

1. Ivanov A.P., Kir'yazeva L.P. Experimental-analytical determination of residual stress fields in rolled I-bars. Sbornik nauchnykh trudov DonGTU. 2012. No 36, pp. 377–382 (in Russ.).
2. Shimov G.V., Serebryakov A.V., Serebryakov A.V., Rozenbaum M.A. Investigation of residual stress fields in extra-thin-walled stainless steel pipes after