

УДК 620.179.16:669.017:53+539.3

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 09Г2С ПОСЛЕ РАЗЛИЧНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРНЫЕ ШУМЫ*

Муравьев В.В.¹, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» (vmuraviev@mail.ru)

Леньков С.В.², д.т.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией электромагнитных явлений, профессор кафедры «Приборы и методы контроля качества» (emp@ftiudm.ru)

Дедов А.И.¹, научный сотрудник кафедры «Приборы и методы контроля качества» (superdedov@mail.ru)

Байтеряков А.В.¹, аспирант кафедры «Приборы и методы контроля качества» (email1990@yandex.ru)

Котоломов А.Ю.³, к.т.н., главный сварщик (kotolomov@ptg.gazprom.ru)

¹ Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова
(426069, Россия, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

² Физико-технический институт УрО РАН
(426000, Россия, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Кирова, 132)

³ ОАО «Газпром Трансгаз Чайковский»
(617763, г. Чайковский, Пермский край, Приморский бульвар, 30)

Аннотация. В развитие ультразвуковой структуроскопии предложен новый подход к оценке структуры металла по значению отношения амплитуды среднего уровня акустических структурных шумов к амплитуде «пролаза» рэлеевских волн. Исследовано изменение уровня структурных шумов в стали 09Г2С при одноосном растяжении. Показано влияние механических напряжений и структурного состояния металла на уровень структурных шумов. Установлено наличие связи между параметрами акустических структурных шумов и структурным состоянием стали 09Г2С. Выявлена закономерность резкого снижения уровня структурных шумов при достижении металлом предела текучести. Экспериментально подтверждено, что резкое падение уровня структурных шумов (точка перегиба) при достижении предела текучести подтверждает высокую чувствительность метода к изменениям структуры металла. Этот факт позволяет рекомендовать метод измерения акустических структурных шумов для обнаружения подготовительного этапа процесса, связанного с накоплением повреждаемости в металле, а именно, стадию накопления микродефектности.

Ключевые слова: акустические структурные шумы, одноосное растяжение, предел текучести, трубная сталь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-118-122

Магистральные и технологические нефтегазопроводы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию циклически изменяющихся механических и термических нагрузок разного характера. При наличии структурной неоднородности [1 – 5] возможны усталостные изменения металла, в результате которых возникает накопление поврежденности, появляются макродефекты, приводящие к разрушению конструкции.

Существующие в настоящее время ультразвуковые, электромагнитные и вихретоковые дефектоскопы позволяют выявлять наличие уже образовавшихся достаточно крупных трещин. Однако существенно важнее вовремя обнаружить начальный этап процесса накопления поврежденности в металле путем определения изменений структурного состояния металла [6 – 9].

Целью настоящей работы явилось исследование влияния растягивающей одноосной нагрузки образцов

стали 09Г2С после различной термической обработки на акустические структурные шумы.

Исследования проводили на образцах конструкционной низколегированной стали 09Г2С, широко применяемой при производстве труб и другого металлопродукта. Механические свойства стали 09Г2С после отжига: предел прочности (σ_B) 490 МПа; предел текучести (σ_T) 343 МПа; относительное удлинение при разрыве (δ_5) 20 %; ударная вязкость (КСУ) 590 – 640 кДж/м².

Были изготовлены плоские металлические образцы по ГОСТ 1497 – 84 из трех вырезанных фрагментов ранее эксплуатируемого магистрального трубопровода Ду1420×15,7, поставленных ОАО «Газпром Трансгаз Чайковский». Эти фрагменты предварительно подвергали термической обработке для получения различных структурных состояний. Характеристики подготовленных образцов приведены в табл. 1.

Микроструктуры шлифов образцов, полученных с помощью микроскопа «Axio Vert» фирмы «Zeiss», представлены на рис. 1. Геометрические размеры образцов

* Работа выполнена в рамках проекта № 3.751.2014/К по государственному заданию Министерства образования и науки РФ для ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на 2014 – 2016 гг.

Характеристики образцов

Characteristics of samples

Образец	Режим термообработки	Температура нагрева, °С	Выдержка в печи, час	Условия охлаждения	Балл зерна
1	исходное состояние	—	—	—	4
2	высокий отпуск	600 – 650	1,0	с печью	4
3	нормализация	900 – 930	0,5	на воздухе	7

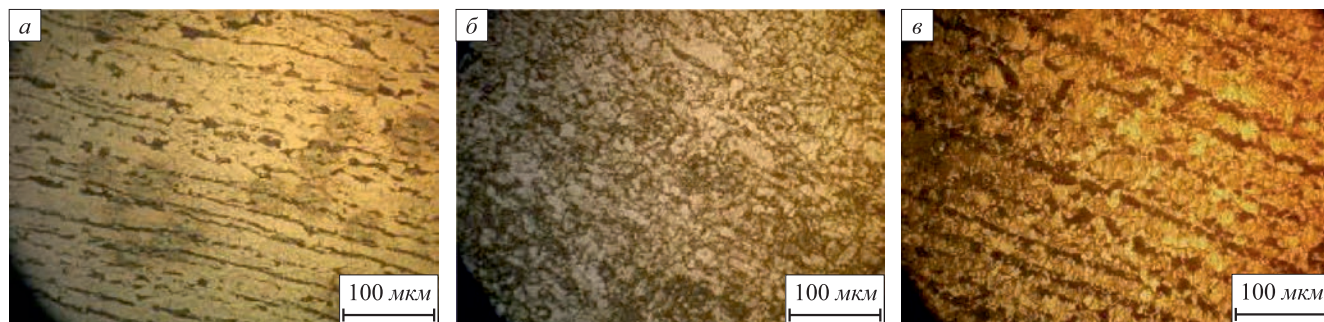


Рис. 1. Микроструктура шлифов образцов 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Fig. 1. Microstructure of samples slices 1 (a), 2 (b) and 3 (c)

для исследований приведены на рис. 2. Образцы имеют корсетный вырез в средней части для концентрации напряжений в этой области и локализации накоплений повреждений при растяжении.

Реальные размеры сечений (S) концентраторов образцов приведены ниже:

Образец	Толщина, мм	Ширина, мм	S , мм ²
1	14,16	23,61	334,32
2	14,46	24,98	361,21
3	14,34	25,06	359,36

Испытания на растяжение металлических образцов проводили с помощью испытательной машины Instron 300DX. Образцы нагружали поступательно с шагом 10 кН до достижения нагрузки в 100 кН, а далее с шагом 5 кН. Схема испытательной установки приведена на рис. 3.

При проведении испытаний соблюдали следующие основные условия: качественное центрирование образца в захватах испытательной машины; плавность деформирования; возможность приостанавливать нагружение при достижении нижней границы предела текучести, сопровождающейся быстрым удлинением образца; плавность разгрузки.

В эксперименте для возбуждения и приема ультразвуковой волны использовали раздельно-совмещенный (РС) преобразователь П112-5,0-Ø8 с малой мертвой зоной с раздельной функцией излучения и приема, конструктивно объединенный в одном корпусе. Электрическое напряжение, поданное с генератора зондирующих

импульсов ультразвукового дефектоскопа ДУК-66 на излучающую пьезопластину РС преобразователя, приводит к возбуждению продольной волны в передающей призме с малым (7°) углом наклона. На границе раздела сред излучающая призма – объект контроля происходит преломление продольной волны. Отраженная от донной поверхности и рассеянная на неоднородностях структуры продольная волна преломляется на границе раздела сред приемная призма – объект контроля и

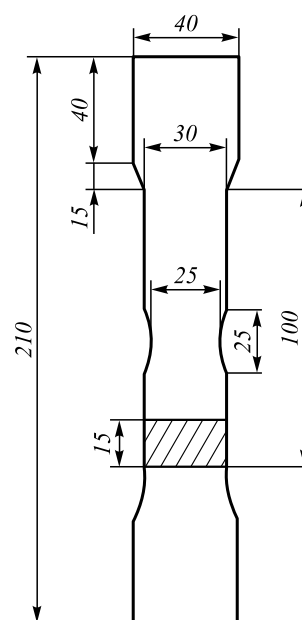


Рис. 2. Образец

Fig. 2. Sample

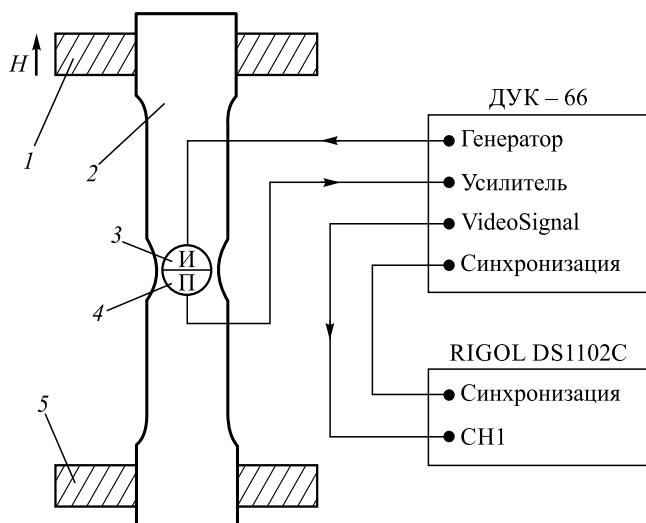


Рис. 3. Схема испытательной установки:

1 – подвижное крепление испытательной машины Instron 3000DX; 2 – исследуемый образец; 3 и 4 – излучающий и приемный пьезопреобразователи; 5 – неподвижное крепление испытательной машины

Fig. 3. Scheme of test unit:

1 – movable mount of test unit Instron 3000DX; 2 – researched sample; 3 and 4 – radiant and reception piezoelectric transducer; 5 – immovable mount of the test unit

преобразуется в электрический сигнал с помощью приемного РС преобразователя. Далее сигнал усиливается высокочастотным усилителем дефектоскопа ДУК-66 на 80 – 90 дБ. Для сохранения и дальнейшей обработки электрического сигнала к выходу «VideoSignal» дефектоскопа ДУК-66 подключен цифровой осциллограф RIGOL DS1102C, синхронизированный с дефектоскопом через линию синхронизации.

Следует отметить, что в зоне контакта излучающей призмы и объекта контроля возникает рэлеевская волна «пролаз», переизлучаемая в приемную призму. В качестве опорного сигнала использован «пролаз» рэлеевской волны U_R . В отличие от донного сигнал «пролаза» рэлеевской волны является наиболее стабильным при изменении качества контакта, шероховатости поверхности и не зависит от состояния донной поверхности [10].

Ввиду того, что уровень структурных шумов является результатом интерференции волн, многократно рассеянных от зерен материала [11], в методике оценивается интегральная характеристика структурного шума U_{SN} , определяемая как результат интегрирования структурного шума по всей рабочей зоне акустического тракта [12]. Интегрирование реализовано в среде MathCad после интерполяции оцифрованного сигнала [13].

На рис. 4 представлена зависимость отношения уровня структурного шума к уровню «пролаза» рэлеевской волны в зависимости от уровня растягивающих напряжений (E) в образцах.

Согласно полученным данным для всех образцов уровень структурного шума изменяется незначитель-

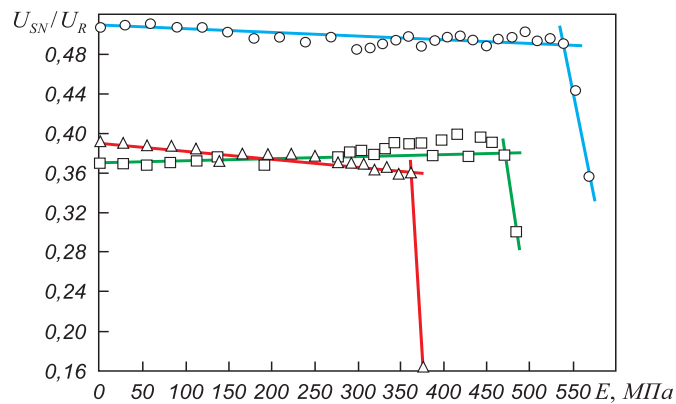


Рис. 4. Зависимость отношения U_{SN}/U_R к величине напряжений образцов 1 (○), 2 (□) и 3 (Δ)

Fig. 4. Dependence of U_{SN}/U_R to sample stress value 1 (○), 2 (□) and 3 (Δ)

но вплоть до достижения предела текучести. В момент достижения предела текучести (точки перегиба, которая характеризует структурные изменения – течение металла) зависимость выражается резким снижением уровня структурного шума.

Таким образом, в зависимости от предварительной термической обработки и соответственно от структуры металла точка резкого снижения уровня структурного шума характеризует начало пластического течения. Эффект объясняется тем, что при механическом нагружении плоского образца в области концентратора напряжений (корсетного выреза) происходит пластическая деформация Чернова–Людерса [14, 15].

Выводы. В результате экспериментов по исследованию влияния растягивающей одноосной нагрузки образцов стали 09Г2С после различной термической обработки на акустические структурные шумы установлено наличие связи между параметрами акустических структурных шумов и структурным состоянием стали 09Г2С; выявлена закономерность резкого снижения уровня структурных шумов при достижении металлом предела текучести. Экспериментально подтверждено, что резкое падение уровня структурных шумов (точка перегиба) при достижении предела текучести подтверждает высокую чувствительность метода к изменениям структуры металла. Этот факт позволяет рекомендовать метод измерения акустических структурных шумов для обнаружения подготовительного этапа процесса, связанного с накоплением повреждаемости в металле, а именно, стадию накопления микродефектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Косинов Д.А. и др. Структура листового проката из низкоуглеродистой стали после удаления окалины // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 4. С. 51 – 55.
2. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Косинов Д.А. и др. Масштабные уровни структуры листового проката из низкоуглеродистой стали // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 6. С. 95 – 98.

3. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Костерев В.Б. и др. Физическая природа упрочнения низкоуглеродистой стали при термомеханической обработке // *Черные металлы*. 2013. № 3 (975). С. 25 – 31.
4. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Морозов К.В., Иванов Ю.Ф. Микроструктура закаленных рельсов. – Новокузнецк: Интер-кузбасс, 2014. – 213 с.
5. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Морозов К.В. и др. Сравнительный анализ структурно-фазовых состояний в рельсах после объемной и дифференцированной закалки // *Сталь*. 2014. № 7. С. 91 – 95.
6. Муравьев В.В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки // *Дефектоскопия*. 1989. № 2. С. 66 – 68.
7. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В., Буденков Б.А. и др. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений // *Дефектоскопия*. 2004. № 8. С. 50 – 55.
8. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В., Лебедева Т.Н. Новая прогрессивная технология дефектоскопии протяженных объектов металлургической и нефтедобывающей промышленности // *Тяжелое машиностроение*. 2004. № 11. С. 18.
9. Муравьева О.В., Злобин Д.В. Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно-протяженных объектов // *Дефектоскопия*. 2013. № 2. С. 43 – 51.
10. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. К расчету преобразователей рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 1992. № 10. С. 76 – 81.
11. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: справочник. В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
12. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В., Дедов А.И. Методика определения акустических структурных шумов металла // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2013. № 1. С. 143 – 148.
13. Муравьев В.В., Котоломов А.Ю., Байтеряков А.В., Дедов А.И. Определение размера зерна металла по акустическим структурным шумам // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 11. С. 65 – 69.
14. Баранникова С.А., Косинов Д.А., Надежкин М.В. и др. Закономерности макроскопической локализации пластической деформации при растяжении низкоуглеродистой стали // *Изв. вуз. Физика*. 2014. Т. 57. № 3. С. 101 – 107.
15. Иванов Ю.Ф., Косинов Д.А., Попова Н.А. и др. Эволюция структуры и фазового состава низкоуглеродистой ферритной стали в условиях наводороживания и деформирования // *Известия РАН. Серия физическая*. 2014. Т. 78. № 3. С. 361.

Поступила 28 ноября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 2, pp. 118–122.

INFLUENCE OF SINGLE-AXIS TENSION OF 09G2S STEEL SAMPLES AFTER DIFFERENT THERMAL TREATMENT ON ACOUSTIC STRUCTURAL NOISES

V.V. Murav'ev¹, S.V. Len'kov², A.I. Dedov¹, A.V. Baiteryakov¹, A.Yu. Kotolomov³

¹ Izhevsk State Technical University after M.T. Kalashnikov, Izhevsk, Russia

² Institute of Applied Physics of Ural Branch of Russian Academy of Science, Izhevsk, Russia

³ JSC "Gasprom Transgas Tchaikovsky", Tchaikovsky, Russia

Abstract. In the development of ultrasound structurescopy the authors have offered a new approach to the assessment of metal structure by ratio value of amplitude of a middle level of acoustic structural noises to the amplitude of «appear» of Rayleigh waves. The level change of structural noises in 09G2S steel at single-axis tension has been researched. The influence of mechanical stresses, as well as structural metal states on the level of structural noises has been shown. The authors have determined the presence of relation between the parameters of acoustic structural noises and structural state of 09G2S steel. Also the authors revealed the regularity of sharp decrease of the level of structural noises when metal reaches the yield point. It has been experimentally confirmed that the sharp drop of the level of structural noises (the inflection point), when reaching the yield point, confirms a high sensitivity of the method to the changes of metal structure. This fact allows recommending the measurement method of acoustic structural noises to reveal the preparatory stage of the process, connected with the accumulation of the damageability in metal, namely, the stage of accumulation of microimperfection.

Keywords: acoustic structural noises, single-axis tension, fluidity limit, pipe steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-118-122

REFERENCES

1. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kosinov D.A., Konovalov S.V., Barannikova S.A. The structure of low carbon steel rolled sheets after mill

scale removing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 4, pp. 51–55. (In Russ.).

2. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kosinov D.A., Popova N.A., Konovalov S.V. Scale levels of flats structure from low-carbon steel. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2013, vol. 16, no. 6, pp. 95–98. (In Russ.).
3. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kosterev V.B., Efimov O.Yu., Yur'ev A.B., Konovalov S.V. Physical nature of low-carbon steel hardening at thermo-mechanical treatment. *Chernye metally*. 2013, no. 3 (975), pp. 25–31. (In Russ.).
4. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. *Mikrostruktura zakalennykh rel'sov* [Microstructure of hardened rails]. Novokuznetsk: Inter-kuzbass, 2014, 213 p. (In Russ.).
5. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Volkov K.V., Ivanov Yu.F. Structural and phase states of bulk-quenched rail and differentially quenched rail. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 7, pp. 553–557.
6. Murav'ev V.V. Velocity interdependence of ultrasound in steel with the modes of their thermal treatment. *Defektoskopiya*. 1989, no. 2, pp. 66–68. (In Russ.).
7. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V., Budenkov B.A., Lebedeva T.N., Zlobin D.V. Acoustic nondestructive testing of rods using multiple reflections. *Defektoskopiya*. 2004, no. 8, pp. 51–55. (In Russ.).
8. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V., Lebedeva T.N. New progressive defectoscopy technology of drawling objects of metallurgical and oil industries. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2004, no. 11, pp. 18. (In Russ.).
9. Murav'eva O.V., Zlobin D.V. Acoustic channel of the multiple reflection method at defectoscopy of linear-drawling objects. *Defektoskopiya*. 2013, no. 2, pp. 43–51. (In Russ.).
10. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V. On calculation of the piezoelectric transducers of Rayleigh waves. *Defektoskopiya*. 1992, no. 10, pp. 76–81. (In Russ.).
11. Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik*. V 7 t. T. 3. *Ul'trazvukovoi kontrol'* [Nondestructive testing: Reference book. Vols. 1–7. Vol. 3. Ultrasonic check]. Klyuev V.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 864 p. (In Russ.).

12. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Baiteryakov A.V., Dedov A.I. Testing method of acoustic structural noises of metals. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2013, no. 1, pp. 143–148. (In Russ.).
13. Murav'ev V.V., Kotolomov A.Yu., Baiteryakov A.V., Dedov A.I. The methodology of determining the grain size by acoustic structural noise of steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 11, pp. 65–69. (In Russ.).
14. Barannikova S.A., Kosinov D.A., Nadezhkin M.V., Lunev A.G., Gorbatenko V.V., Zuev L.B., Gromov V.E. Regularities of Macroscopic Localization of Plastic Deformation in the Stretching of a Low-Carbon Steel. *Russian Physics Journal*. 2014, vol. 57, no. 3, pp. 396–402.
15. Ivanov Yu.F., Kosinov D.A., Popova N.A., Gromov V.E., Konovalov S.V. Evolution of the structure and phase composition of low-carbon ferrite steel under conditions of hydrogen saturation and deformation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2014, vol. 78, no. 3, pp. 237–240.

Acknowledgements. The work was performed in the frameworks of project no. 3.751.2014/K according to state task of the Ministry of Education

and Science of RF for Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education “Kalashnikov State Technical University” for 2014 – 2016 years.

Information about the authors:

V.V. Murav'ev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Devices and Methods for Quality Control” (vmuraviev@mail.ru)

S.V. Len'kov, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Electromagnetics, Professor of the Chair “Devices and Methods for Quality Control” (emp@ftiudm.ru)

A.I. Dedov, Research Associate of the Chair “Devices and Methods for Quality Control” (superdedov@mail.ru)

A.V. Baiteryakov, Postgraduate of the Chair “Devices and Methods for Quality Control” (email1990@yandex.ru)

A.Yu. Kotolomov, Cand. Sci. (Eng.), Chief Welder (kotolomov@ptg.gazprom.ru)

Received November 28, 2015