Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 117–123. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2021. Vol. 19, No. 6, P. 117–123. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 620.1 (075.8)

doi: 10.17122/ngdelo-2021-6-117-123

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ 09Г2С ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Виктория Александровна Гафарова¹, Ольга Расилевна Абдулганиева¹,
Арина Дмитриевна Иванова¹, Дмитрий Ефимович Бугай¹,
Искандер Рустемович Кузеев¹, Олег Ренатович Латыпов¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку

Виктория Александровна Гафарова, gafarova.vika@bk.ru

Аннотация. При расследовании аварий на различных объектах нефтегазовых месторождений становится очевидным, что многие разрушения связаны с ударными нагрузками, возникающими в результате резкого изменения технологических параметров процесса. Кинетическая энергия потока жидкости может переходить в энергию деформации воспринимающего объекта. В таких случаях разрушение от гидравлического удара носит, как правило, катастрофический характер. Представляют интерес закономерности изменения структуры металла при восприятии им динамических нагрузок, поскольку в момент контакта объекта с грузом на начальном этапе развиваются упругие деформации, которые переходят в пластические, причем с большой скоростью. Известно, что в результате ударного воздействия металл приобретает хрупкие свойства, что требует дополнительного изучения. Для исследования использовали низколегированную сталь 09Г2С, которая широко применяется в нефтегазовой отрасли. Эксперимент заключался в создании динамической нагрузки на пластину, свободно располагающуюся на опоре. Из деформированного металла вырезались образцы и подвергались металлографическому анализу. За короткий период времени взаимодействия пластины с грузом изменилось локальное распределение феррита в структуре стали, и увеличился средний размер зерна. Предложены два возможных механизма реализации этого явления: рост размера зерен указывает на трансформацию их границ за счет высокой скорости передачи энергии удара; перестроение дислокационной структуры с формированием новых границ. Второй механизм, на наш взгляд, более предпочтителен, поскольку одновременно с изменением распределения зерен феррита в структуре и ростом их размера происходит перераспределение углерода, что согласуется с данными А.В. Ганеева, которым показано, что в результате интенсивной пластической деформации происходит скопление углерода на границах зерен феррита даже при комнатной температуре.

При анализе металла, испытавшего ударные нагрузки, необходимо проводить сравнительный анализ структуры проб, отобранных непосредственно из зоны разрушения, и проб металла с участков, которые не были подвергнуты ударным нагрузкам.

Для цитирования

Гафарова В.А., Абдулганиева О.Р., Иванова А.Д., Бугай Д.Е., Кузеев И.Р., Латыпов О.Р. Изменение микроструктуры стали 09Г2С при ударных нагрузках // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 117–123. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-117-123>.

Ключевые слова

ударные нагрузки,
дефекты структуры,
гидравлический удар,
сталь 09Г2С

Original article

CHANGES TO MICROSTRUCTURE OF 09Г2С STEEL UNDER IMPACT STRESS

Victoria A. Gafarova¹, Olga R. Abdulganieva¹, Arina D. Ivanova¹,
Dmitriy E. Bugai¹, Iskander R. Kuzeev¹, Oleg R. Latypov¹

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Corresponding author

Victoria A. Gafarova, gafarova.vika@bk.ru

Abstract. Investigations of emergencies at various oil and gas sites reveal that many destructions are caused by impact stress. This impact stress is the result of a sharp change of the process technological parameters. The liquid flow kinetic energy can transform into the strain energy of the impacted object. In such cases hydraulic shock destruction is usually disastrous. It is relevant to study how the metal structure changes under dynamic impacts because when the object gets under a load, elastic deformations are the first to appear, then they start rapidly turning into plastic deformations. It is believed that a physical impact shock makes the metal fragile. This issue requires further researching. This research focused on 09Г2С low alloyed steel. This steel is widely used in the oil and gas industry. The experiment took creating a dynamic impact on a plate put on a support without securing. Samples were cut out of the deformed metal plate and exposed to a metallographic analysis. The plate was under the impact for a short period of time and ended up with a changed ferrite local distribution in the steel structure and enhanced average grain size. The research suggests two possible approaches to this phenomenon. First, if the grain size grows, it means the rapid impact energy transmission transforms the grain dimensions. Second, the new dimensions result in relocations in the structure. The second approach is more preferable for us, because the ferrite grains are changing their location in the structure and growing in size alongside the carbon re-distribution. This conforms to the A.V. Ganeev's theses showing that an intensive plastic deformation initiates carbon gathering at the ferrite grain boundaries even at the room temperature.

When analyzing the metal that has been exposed to impact stress, it is important to compare the structures of the samples sampled within the destruction area with the metal samples sampled from areas free from the impact stress.

For citation

Gafarova V.A., Abdulganieva O.R., Ivanova A.D., Bugai D.E., Kuzeev I.R., Latypov O.R. *Izmenenie mikrostruktury stali 09g2s pri udarnykh nagruzkakh* [Changes to Microstructure of 09Г2С Steel under Impact Stress]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 6, pp. 117–123. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-117-123>.

По различным причинам в трубопроводах, запорной арматуре, перекачивающих агрегатах при перемещении жидкостей может происходить скачкообразное изменение давления, которое воспринимается металлом как гидравлический удар. Чаще всего этот эффект возникает при соударении транспортируемого агента с препятствием [1, 2]. Кинетическая энергия потока может в значительной степени переходить в энергию деформации пластины. Актуальность исследования заключается в том, что в результате динамических нагрузок происходят разрушения, которые носят катастрофический характер, как это показано на рисунке 1.

Keywords

impact stress, structure defects, hydraulic shock, 09Г2С

Рисунок 1. Разрушение корпуса задвижки при гидроударе

Figure 1. Destruction of the valve body during hydraulic impact

При расследовании таких аварий трудно идентифицировать локализацию первичного разрушения металла, поскольку процесс носит каскадный характер. В классической теории ударного взаимодействия используется уравнение Жуковского и некоторые его модификации [3]. Применение этих уравнений при расчетах требует использования существенных упрощающих постулатов. Величина деформаций определяются из закона Гука, при этом динамическое воздействие на металл учитывается с помощью коэффициента, связанного со скоростью звука во взаимодействующих средах. Расчетные значения разрушающих напряжений могут отличаться в несколько раз вследствие неучтенной потери энергии на возбуждение колебаний в звуковом диапазоне [4]. В [5] отмечается, что при ударных нагрузках материал подвержен охрупчиванию. С другой стороны, численное моделирование распространения ударной волны в пористом материале открывает возможность повышения устойчивости к откольному разрушению за счет поглощения энергии волны внутренней структурой и разделения фронта этой волны на упругий предвестник и пластический фронт [6]. Эти результаты коррелируют с данными работы [7], в которой показано влияние микросдвигов на расщепление фронта микротрещин.

В [8] рассмотрены проблемы ударного взаимодействия твердых тел. Отмечается, что некоторые аспекты процесса разрушения недостаточно изучены. В частности, перспективным представляется аналитическое и численное решение задачи деформирования прямоугольной пластины локальным воздействием груза.

Физическое моделирование удара проводили на установке, состоящей из груза циклической формы весом 32 кг, подъем которого осуществляли с помощью монтажного блока с механическим подъемником, и прямоугольной пластины, свободно располагающейся на опоре.

Технические параметры испытательного стенда:

- вес падающего груза — 32 кг;
- высота подъема груза $H = 3700$ мм;
- размеры пластины — $400 \times 400 \times 4$ мм.

В ходе ударного нагружения произошло деформирование пластины из стали 09Г2С в месте контакта с грузом (рисунок 2).

Образцы для дальнейших исследований были отобраны в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.

Рисунок 2. Зона удара

Figure 2. Impact zone

Рисунок 3. Схема расположения образцов

Figure 3. Layout of samples

Далее проводился анализ структур материала в исходном состоянии и вырезанных образцов из зоны ударного нагружения. При этом отобранные пробы подвергались шлифованию, полированию и последующему травлению в течение 20 с 5 %-ым раствором азотной кислоты. В таблице 1 приведены результаты анализа структур. Известно, что величина и форма зерна влияют на механические свойства металлов.

По результатам микроструктурного анализа можно сделать следующие выводы:

- на снимке видна зернистая структура, характерная для стали 09Г2С;
- структура стали изменилась в сторону укрупнения зерен.

Следующий этап исследований заключался в определении объемной доли фаз.

Объемная доля феррита определялась методом «случайных линий». В таблице 2 приведены результаты исследований.

В таблице 3 приведены результаты анализа структур в соответствии с ГОСТ 5639-82.

Таблица 1. Микроструктура образцов при увеличении 500×

Table 1. Microstructure of samples at a magnification of 500×

№ образца	Исходный образец	
1
2
3
4

Таблица 2. Результаты определения объемной доли феррита**Table 2.** Results of determining the volume fraction of ferrite

№ образца	$f_{A1}, \%$	$f_{A2}, \%$	$f_{A3}, \%$	$f_{A4}, \%$	$f_{Acp}, \%$
В исходном состоянии	82,1	75,3	70,0	85,4	78,2
1	88,5	75,6	84,9	84,0	83,3
2	87,2	84,6	69,2	88,4	82,4
3	77,3	82,4	86,3	81,0	81,8
4	82,7	77,1	87,8	79,6	81,8

Таблица 3. Результаты анализа структур**Table 3.** Results of analysis of structures

Параметры	Исходный образец	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Общее количество измеренных зерен n	156	91	96	135	138
Количество зерен на 1 мм ² , m	74440	73175	68855	71239	70202
Средняя площадь зерна а, мм ²	0,000013 (13 мкм ²)	0,000014 (14 мкм ²)	0,000015 (15 мкм ²)	0,000014 (14 мкм ²)	0,000014 (14 мкм ²)
Средний диаметр зерна d _м , мм	0,0037 (3,67 мкм)	0,0037 (3,70 мкм)	0,0038 (3,81 мкм)	0,0037 (3,75 мкм)	0,0038 (3,77 мкм)
Коэффициент анизотропии зерна А	1,14	0,96	1,03	1,11	1,05
Номер зерна G	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
Средний условный размер зерна l, мкм	3,42	3,45	3,55	3,49	3,52

Некоторое изменение доли феррита авторы связывают с высокоскоростной пластической деформацией. В работе [9] показано, что в результате интенсивной пластической деформации происходит скопление углерода на границах ферритных зерен, причем это наблюдается даже при комнатной температуре. Выявленные при исследовании особенности изменения структуры стали 09Г2С позволяют разработать алгоритм оценки влияния гидроудара на характер изменения ее механических свойств и принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Газаров А.Р., Колосов Р.А., Ховрина Е.И. Гидравлический удар в трубопроводах: расчет и предотвращение // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 557-559.
- Френкель Н.З. Гидравлика. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 456 с.
- Липанов А.М., Вахрушев А.В., Федотов А.Ю. Исследование динамического взаимодействия твердых тел методами математического моделирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2015. Т. 8. № 1. С. 53-65. DOI: 10.14529/mmp150104.

Вывод

Проведенные исследования изменения структуры стали 09Г2С в результате ударного воздействия показали, что происходит увеличение размера зерна в зоне интенсивного деформирования, и изменяется содержание зерен феррита в локальных зонах. Такие металлографические признаки позволяют оценивать состояние стали оборудования, подвергнутого ударным нагрузкам, и принимать решение о возможности его дальнейшей эксплуатации.

- Кочетков А.В., Федотов П.В. Некоторые вопросы теории удара // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 5. С. 1-15. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf> (дата обращения: 01.10.2021).
- Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976. 608 с.
- Кривцов А.-И.М. Деформирование и разрушение твердых тел с микроструктурой: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 234 с.
- Савельева Н.В. Моделирование упругопластического перехода и разрушения материалов при ударно-волновом нагружении: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. 109 с.
- Барановский Г.К. Упругопластический удар массивного тела по прямоугольной пластине, лежащей на

основании: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2002. 225 с.

9. Ганеев А.В. Особенности формирования сегрегаций и карбидов железа на границах зерен и механизмы упрочнения в ультрамелкозернистых углеродистых сталях, полученных интенсивной пластической деформацией кручением: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. 170 с.

REFERENCES

1. Gazarov A.R., Kolosov R.A., Khovrina E.I. *Gidravlicheskiy udar v truboprovodakh: raschet i predotvrashchenie* [Hydraulic Shock in Pipelines: Calculation and Prevention]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University*, 2019, Issue 12, pp. 557-559. [in Russian].

2. Frenkel N.Z. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1956. 456 p. [in Russian].

3. Lipanov A.M., Vakhrushev A.V., Fedotov A.Yu. *Issledovanie dinamicheskogo vzaimodeistviya tverdykh tel metodami matematicheskogo modelirovaniya* [Investigation of Dynamic Interactions of Solids by Methods of Mathematical Simulations]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye — Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2015, Vol. 8, No. 1, pp. 53-65. DOI: 10.14529/mmp150104. [in Russian].

4. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. *Nekotorye voprosy teorii udara* [Some Questions of the Theory of Blow]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» — Internet Journal «Naukovedenie»*,

2013, No. 5, pp. 1-15. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf> (accessed 01.10.2021). [in Russian].

5. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 608 p. [in Russian].

6. Krivtsov A.-I.M. *Deformirovanie i razrushenie tverdykh tel s mikrostrukturoi: dis. d-ra fiz.-mat. nauk* [Deformation and Destruction of Solids with a Microstructure: Doct. of Physical and Mathematical Sci. Diss.]. St. Petersburg. SPbGTU Publ., 2002. 234 p. [in Russian].

7. Saveleva N.V. *Modelirovanie uprugoplasticheskogo perekhoda i razrusheniya materialov pri udarno-volnovom nagruzenii: dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Modeling of Elastoplastic Transition and Fracture of Materials Under Shock-Wave Loading: Cand. of Physical and Mathematical Sci. Diss.]. Perm, PNIPU Publ., 2015. 109 p. [in Russian].

8. Baranovskii G.K. *Uprugoplasticheskiy udar massivnogo tela po pryamougol'noi plastine, lezhashchei na osnovanii: dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Elastoplastic Impact of a Massive Body on a Rectangular Plate Lying on the Base: Cand. of Physical and Mathematical Sci. Diss.]. Rostov-on-Don, RGU Publ., 2002. 225 p. [in Russian].

9. Ganeev A.V. *Osobennosti formirovaniya segregatsii i karbidov zheleza na granitsakh zeren i mekhanizmy uprochneniya v ul'tramelkozernistykh uglerodistykh stalyakh, poluchennykh intensivnoi plasticheskoi deformatsiei krucheniem: dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Features of the Formation of Segregations and Iron Carbides at Grain Boundaries and Mechanisms of Hardening in Ultrafine-Grained Carbon Steels Obtained by Severe Plastic Deformation by Torsion: Cand. of Physical and Mathematical Sci. Diss.]. Ufa, UGATU Publ., 2019. 170 p. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гафарова Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Victoria A. Gafarova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia

gafarova.vika@bk.ru

Абдулганиева Ольга Расилевна, преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Olga R. Abdulganieva, Lecturer of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia

oabdulganieva@bk.ru

Иванова Арина Дмитриевна, магистрант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Arina D. Ivanova, Under-Graduate Student of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia

ivanova_arinal@mail.ru

Бугай Дмитрий Ефимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и защита от коррозии», УГНТУ, Уфа, Россия

Dmitry E. Bugai, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Materials and Corrosion Protection Department, USPTU, Ufa, Russia

debugai@mail.ru

Кузеев Искандер Рустемович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia

kuzeev2002@mail.ru

Латыпов Олег Ренатович, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и защита от коррозии», УГНТУ, Уфа, Россия

Oleg R. Latypov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Materials and Corrosion Protection Department, USPTU, Ufa, Russia

o.r.latypov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.08.2021; одобрена после рецензирования 31.08.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 12.08.2021; approved after reviewing 30.08.2021; accepted for publication 01.11.2021.