

УДК 620.178.7

Влияние внешней среды на показатели надежности деталей горных машин, работающих в условиях динамического сжатия*

П.А. ПОПЕЛЮХ, А.А. НИКУЛИНА, А.И. ПОПЕЛЮХ

Исследовано влияние внешней среды на сопротивление среднеуглеродистой стали усталостному разрушению в условиях многократного динамического нагружения сжатием. Результаты испытаний в воздушной среде, воде, минеральном масле и спирте свидетельствуют, что в жидких средах по сравнению с воздухом скорость разрушения стали увеличивается в четыре–пять раз. Экспериментально показано, что быстрое разрушение сталей в воде происходит вследствие коррозионных процессов, а снижение показателей сопротивления циклическому разрушению в минеральном масле связано с ростом напряжений в материале из-за микрогидравлических ударов и кавитации. Неметаллические включения, содержащиеся в стали, интенсифицируют коррозионное разрушение и оказывают отрицательное влияние на ее сопротивление усталостному разрушению.

Ключевые слова: ударные машины, усталостное разрушение, коррозия, динамическое сжатие.

ВВЕДЕНИЕ

Машины ударного действия являются одним из наиболее производительных видов оборудования для бурения скважин и бестраншейной прокладки подземных коммуникаций. Высокая энергия ударного нагружения позволяет не только эффективно разрушать горную породу, но одновременно является причиной низкого ресурса работы ударных машин [1]. Типичной причиной выхода из строя деталей ударных механизмов является их усталостное разрушение, часто сопровождаемое процессами коррозии. Коррозионная среда может как снижать циклическую трещиностойкость стали за счет процессов водородного охрупчивания и коррозионного растрескивания, так и увеличивать сопротивление разрушению за счет эффектов закрытия трещины и затупления ее вершины [2]. Практически все исследования, показывающие, что усталостные трещины могут зарождаться и распространяться в условиях циклического сжатия [3–12], были проведены на воздухе, что не позволяет оценить влияние процессов коррозии на трещиностойкость материалов при данном виде нагружения. Целью работы являлось изучение влияния среды на процесс разрушения среднеуглеродистых сталей в условиях ударно-циклического нагружения сжатием.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на двух марках стали – SCM 445H производства Японии и российской стали 45, термически упрочненных закалкой с отпуском до твердости HRC 48 – 52. Загрязненность стали SCM 445H неметаллическими включениями не превышала первого балла, а загрязненность стали 45 соответствовала четвертому баллу по ГОСТ 1778-70. Химический состав сталей приведен в таблице.

* Статья получена 15 марта 2013 г.

Работа выполнена в рамках программы «Формирование государственных заданий высшим учебным заведениям на 2013 год и на плановый период 2014 и 2015 годов в части проведения научно-исследовательских работ».

Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Содержание легирующих элементов, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Cu	Fe
SCM 445H (Япония)	0,44	0,66	0,27	0,89	0,03	0,01	0,016	0,01	0,05	основа
Сталь 45 (Россия)	0,44	0,54	0,21	0,01	0,04	0,01	0,033	0,01	0,12	основа

Испытания выполняли на установке электромагнитного типа, реализующей схему ударного сжатия плоских образцов размером $35 \times 10 \times 3$ мм. На боковых поверхностях образцов были нанесены надрезы шириной 0,5 мм и глубиной 1 мм. Принцип работы установки и особенности метода описаны в работе [13]. Частота нагружения составляла 500 ударов в минуту при энергии единичного удара, равной 7 Дж. В процессе испытаний на поверхность образца капельным способом со скоростью 50 мл/час подавали водопроводную воду, минеральное масло или изопропиловый спирт. В качестве эталона использовали результаты испытаний на спокойном воздухе. В процессе испытаний фиксировали время зарождения и скорость распространения усталостных трещин, а также полное время, затраченное на разрушение каждого образца. Для каждой стали и исследуемой среды испытывали серию из четырех образцов. Исследование процессов зарождения и распространения усталостных трещин осуществляли на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver Alm. Фрактографические исследования выполняли на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов исследований показал, что максимальную долговечность сталей обеспечивают испытания в воздушной среде (рис. 1). Присутствие жидкости на поверхности образца ускоряет процесс зарождения усталостных трещин и увеличивает скорость их распространения. Минимальная усталостная долговечность образцов зафиксирована при испытаниях в воде. Она в пять раз ниже по сравнению с результатами, полученными в воздушной среде. Испытания в изопропиловом спирте, который при сходной с водой кинематической вязкости обладает низкой коррозионной активностью, показали, что усталостная долговечность образцов снижается в полтора раза. Это позволяет предполагать, что высокая скорость разрушения при смачивании поверхности образца водой, прежде всего, обусловлена процессами коррозии. Исследования свидетельствуют, что при многократном динамическом нагружении образца по схеме сжатия зарождение и рост усталостной трещины обеспечивают остаточные растягивающие напряжения, возникающие в окрестности вершины на этапе разгрузки образца [3–6]. Коррозионноактивная среда способствует растворению материала в вершине трещины и заполнению ее продуктами фреттинг-коррозии, что приводит к росту остаточных растягивающих напряжений и ускорению процесса разрушения.

Процесс разрушения образцов в минеральном масле так же протекает достаточно быстро (рис. 1). Фрактографический анализ испытанных в масле образцов показал, что значительная площадь поверхности разрушения занята участками, напоминающими мелкую шагрень (рис. 2, а). Небольшое количество областей со следами пластической деформации и малая их площадь позволяют сделать вывод, что при цикле сжатия внутри трещины находится среда, которая не позволяет берегам трещины контактировать между собой. Данные микрорентгеноспектрального анализа поверхности разрушения испытанных в масле образцов показали отсутствие на них оксидной пленки, что является косвенным свидетельством низкой скорости коррозионных процессов. Вероятно, причиной высокой скорости разрушения стали при испытаниях в масле являются гидроудары, возникающие в трещине при сжатии. Формирование рельефа происходит в результате пластической деформации и выкрашивания микрообъемов материала по механизму кавитационной эрозии. Эффект кавитации возникает на этапе разгрузки образца, когда напряжения, накопленные в материале при упругой деформации, раз-

двигают берега заполненной маслом трещины. Давление жидкости в трещине быстро уменьшается, что может приводить к появлению на поверхности материала кавитационных пузырьков. После испытаний образцов в воде или изопропиловом спирте поверхность разрушения имеет обширные области со следами пластической деформации, что свидетельствует о том, что находящаяся в трещине среда легко выдавливается при сжатии и слабо препятствует закрытию трещины (рис. 2, б).

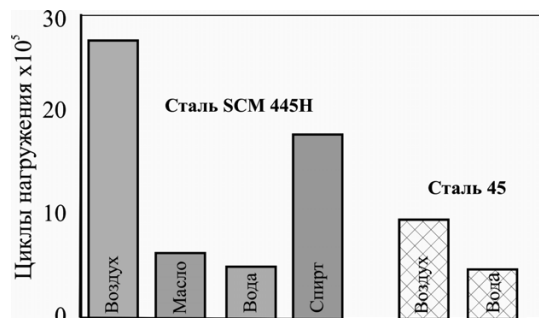


Рис. 1. Долговечность стали SCM 445H и 45 (HRC 50) при испытаниях в различных средах

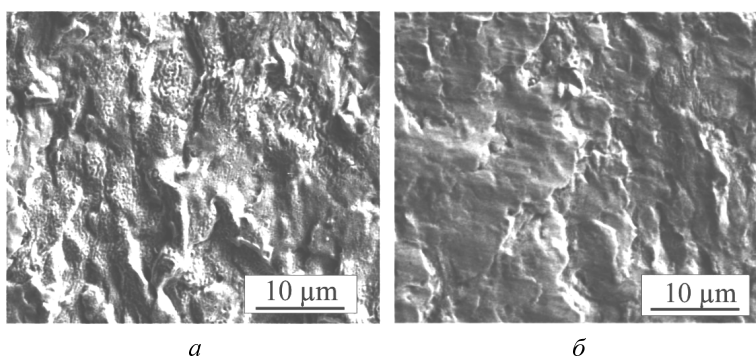


Рис. 2. Поверхность разрушения стали SCM 445H:

а – испытания в масле; б – испытания в изопропиловом спирте

Процесс разрушения стали в условиях циклического нагружения сжатием происходит в несколько этапов. На начальном этапе во всех типах жидких сред вблизи механических концентраторов напряжений происходит интенсивное образование большого количества одновременно растущих усталостных трещин в форме куста (рис. 3, а). При испытаниях в химически инертных средах – минеральном масле или изопропиловом спирте на следующем этапе разрушения одна из трещин становится магистральной, а остальные прекращают свой рост. При испытаниях в воде процессы коррозии и усталостного повреждения приводят к интенсивному образованию и развитию вблизи концентратора напряжений системы периферийных трещин (рис. 3, б). С увеличением продолжительности испытаний усталостные трещины начинают появляться на значительном расстоянии от надреза в областях, которые в начале эксперимента деформировались упруго (рис. 3, в). При испытании в воде возможны случаи, когда магистральной становится трещина, зародившаяся за пределами зоны пластической деформации вблизи надреза.

Негативное влияние на показатели усталостной долговечности стали оказывают содержащиеся в ней неметаллические включения. Они являются преимущественными местами зарождения микротрещин и оказывают существенное влияние на скорость и траекторию их распространения. Наиболее интенсивно процессы трещинообразования протекают в стали 45,

в которой строчечные включения были ориентированы перпендикулярно направлению действующей сжимающей нагрузки (рис. 4, *а*). Строчечные включения, ориентированные вдоль направления действия сжимающей силы, также могут являться местами зарождения микротрещин. На первоначальном этапе появления усталостной трещины происходит в направлении, совпадающем с ориентацией включения, затем трещина изменяет направление своего распространения и развивается в плоскости, перпендикулярной действующей нагрузке (рис. 4, *б*). Снижение трещиностойкости стали SCM 445H с неметаллическими включениями глобулярной формы при испытаниях в воде также в значительной мере связано с процессами коррозионного повреждения.

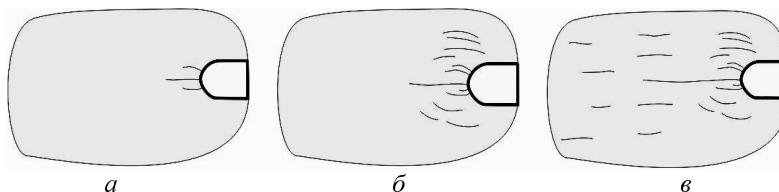


Рис. 3. Схема образования и роста усталостных трещин:

а – зарождение трещин у концентратора напряжений; *б* – образование периферийных трещин; *в* – зарождение трещин на неметаллических включениях и дефектах

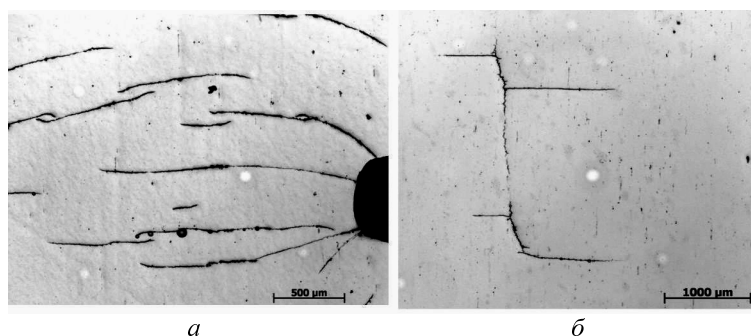


Рис. 4. Образование периферийных трещин вблизи неметаллических включений, ориентированных перпендикулярно (*а*) и продольно (*б*) направлению действия сжимающей нагрузки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях многократного динамического нагружения сжатием присутствие на поверхности стали жидкой среды – воды или минерального масла увеличивает скорость разрушения стали в несколько раз по сравнению с испытаниями в воздушной среде. Быстрое разрушение сталей в воде происходит вследствие интенсивного протекания процессов коррозионного разрушения и растворения материала в вершине растущей трещины. Это приводит к увеличению остаточных растягивающих напряжений в окрестности вершины, под действием которых происходит процесс разрушения. Процесс разрушения образцов в минеральном масле также протекает с высокой скоростью, сопоставимой с разрушением в водопроводной воде. Снижение показателей сопротивления циклическому разрушению в минеральном масле, вероятно, связано с ростом напряжений в материале вследствие микрогидравлических ударов и кавитационных процессов.

В условиях многократного динамического нагружения сжатием процесс разрушения стали характеризуется интенсивным образованием большого количества одновременно распространяющихся усталостных трещин, как в области пластической деформации вблизи концентратора напряжений, так и вблизи дефектов в стали. Неметаллические включения, содержащиеся в стали, интенсифицируют коррозионное разрушение и оказывают отрицательное влияние на ее со-

противление усталостному разрушению. Наиболее активно процессы зарождения и распространения трещин происходят в сталях со строчечными неметаллическими включениями, ориентированными перпендикулярно направлению действующей сжимающей нагрузки. Таким образом, применение жидких рабочих сред или водно-воздушной смеси вместо воздушного энергоносителя может приводить к существенному снижению ресурса работы деталей ударных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Иванов К.И.** Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых / К.И. Иванов, В.А. Латышев, В.Д. Андреев. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
- [2] **Усталость** и циклическая прочность конструкционных материалов/ О.Н. Романов, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др. – Киев: Наукова Думка, 1990. – 680 с.
- [3] **Reid C.N.** Fatigue in compression / C.N. Reid, K. Williams, R. Hermann // *Fatigue of Engineering Materials and Structures*. – 1979. – № 1. – P. 267–270.
- [4] **Holm D.K.** Growth of cracks under far-field cyclic compressive loads: numerical and experimental results / D.K. Holm, A.F. Blom and S. Suresh // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1986. – Vol. 23. – № 6 – P. 1097–1106.
- [5] **Christman T.** Crack initiation under far-field cyclic compression and the study of short fatigue crack / T. Christman, S. Suresh // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1986. – Vol. 23. – № 6 – P. 953–964.
- [6] **Suresh S.** Crack initiation in cyclic compression and its applications / S. Suresh // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1985. – Vol. 21. – № 6. – P. 453–463.
- [7] **Репин А.А.** Методы повышения надежности деталей ударных машин / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, А.И. Попелюх // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – № 4. – 2012. – С. 94–101.
- [8] **Vasudevan A.K.** Analysis of fatigue cracks growth under compression – compression loading / A.K. Vasudevan, K. Sadananda // *International Journal of Fatigue*. – 2001. – Vol. 23, Supplement 1 – P. 365–374.
- [9] **Тихомиров В.М.** Рост трещины при знакопеременном цикле нагружения / В.М. Тихомиров // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49. – № 5. – С. 190–198.
- [10] **Шабанов А.П.** О механизме роста усталостной трещины в поле внешних сжимающих напряжений / А.П. Шабанов // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 46. – № 6. – С. 108–115.
- [11] **Шабанов А.П.** О формировании усталостных трещин в образцах, помещенных в поле внешних сжимающих напряжений / А.П. Шабанов // Вестник СГУПС. – Вып. 12. – Новосибирск, 2005. – С. 42–46.
- [12] **Lenets Y.N.** Compression fatigue cracks growth behavior of metallic alloys: effect of environment / Y.N. Lenets // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1997. – Vol. 57. – № 5. – P. 527–539.
- [13] **Тушинский Л.И.** Установка для проведения ударно-усталостных испытаний / Л.И. Тушинский, А.А. Батаев, В.А. Батаев, А.И. Попелюх // Заводская лаборатория. – 1996. – № 5. – С. 45–47.

REFERENCES

- [1] Ivanov K.I., Latyshev V.A., Andreev V.D. Tehnika burenija pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. M.: Nedra, – 1987. – 272 s.
- [2] Ustalost' i ciklicheskaja prochnost' konstrukcionnyh materialov/ Romaniv O.N., Jarema S.Ja., Nikiforchin G.N. i dr. Kiev: Naukova Dumka. – 1990. – 680 s.
- [3] Reid S.N. Fatigue in compression / S.N. Reid, K. Williams, R. Hermann // *Fatigue of Engineering Materials and Structures*. – 1979. – № 1 – P. 267–270.
- [4] Holm D.K. Growth of cracks under far-field cyclic compressive loads: numerical and experimental results / D.K. Holm, A.F. Blom and S. Suresh // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1986. – Vol. 23, № 6. – P. 1097–1106.
- [5] Christman T. Crack initiation under far-field cyclic compression and the study of short fatigue crack / T. Christman, S. Suresh // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1986. – Vol. 23, № 6 – P. 953–964.
- [6] Suresh S. Crack initiation in cyclic compression and its applications / S. Suresh // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1985. – Vol. 21, № 6 – P. 453–463.
- [7] A.A. Repin, S.E. Alekseev, A.I. Popeljuh. Metody povyshenija nadezhnosti detalej udarnyh mashin. // *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. – № 4. – 2012. – С. 94–101.
- [8] A.K. Vasudevan, K. Sadananda. Analysis of fatigue cracks growth under compression – compression loading / A.K. Vasudevan, K. Sadananda // *International Journal of Fatigue*. – 2001. – Vol. 23, Supplement 1 – P. 365–374.
- [9] Tihomirov V.M. Rost treshhiny pri znakoperemennom cikle naruzhenija / V.M. Tihomirov // *Prikladnaja mehanika i tehnicheskaja fizika*. – 2008. – Т. 49, № 5. – С. 190–198.
- [10] Shabanov A.P. O mehanizme rosta ustalostnoj treshhiny v pole vneshnih szhimajushhih naprjazhenij // *Prikladnaja mehanika i tehnicheskaja fizika*. – 2006. – Т. 46, № 6, С. 108–115.
- [11] Shabanov A.P. O formirovanii ustalostnyh treshhin v obrazcah, pomeshhennyh v pole vneshnih szhimajushhih naprjazhenij // *Vestnik SGUPS*. Vyp. 12. Novosibirsk, 2005. – С. 42–46.
- [12] Lenets. Y.N. Compression fatigue cracks growth behavior of metallic alloys: effect of environment / Y.N. Lenets // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1997. – Vol. 57, № 5 – P. 527–539.
- [13] Tushinskij L.I., Bataev A.A., Bataev V.A. Popeljuh.A.I. Ustanovka dlja provedenija udarno-ustalostnyh ispytanj. Zavodskaja laboratorija. – 1996. – № 5. – С. 45–47.

Попелюх Павел Альбертович, аспирант кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – влияние качества стали на ее сопротивление усталостному разрушению. Имеет 4 публикации. E-mail: ura@mosk.ru

Никулина Аэлита Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – надежность сварных соединений разнородных сталей. Имеет более 30 публикаций. E-mail: lita27@mail.ru

Попелюх Альберт Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – обеспечение надежности горных машин. Имеет более 30 публикаций. E-mail: aip13@mail.ru

P.A. Popelyukh, A.A. Nikulina, A.I. Popelyukh

The influence of the environment on reliability of mining machines parts operating under dynamic compression conditions

The influence of the environments on the fatigue failure resistance of medium carbon steel under multiple dynamic compression is investigated. Materials were fractured in the air, water, mineral oil and alcohol using electromagnetic-type equipment implementing the scheme of impact compression for plate specimens with notches. It has been found that water and mineral oil decrease the fatigue life of samples in 5 times as compared ones tested in air. It is experimentally shown that the reason of rapid steel destruction in water is corrosion process. The reduction in resistance to cyclic degradation in mineral oil is due to higher stresses in the material caused by the hydraulic shock and cavitations. It was found that destruction process is characterized by intensive creation of large amount of simultaneously propagating fatigue cracks near stress concentrators and around non-metallic inclusions in steel. The most active processes of nucleation and propagation of cracks occur in steel with non-metallic inclusions oriented perpendicular to the direction of the compressive load.

Key words: impact machines, fatigue failure, corrosion, dynamic compression, non-metallic inclusions in steel.