Механика деформируемого твердого тела

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-1>
УДК 620.178.4

Е.А. Гридасова, А.В. Веретковский, А.А. Сафарьянц

ГРИДАСОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА – к.т.н., доцент кафедры,
e-mail: olvin@list.ru

ВЕРЕТКОВСКИЙ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – студент,
e-mail: veretkovskyandr@mail.ru

САФАРЬЯНЦ АЛЕКСАНДР АРТЕМОВИЧ – студент, e-mail: sanya.sinister@gmail.com

Кафедра сварочного производства Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Исследования усталостных свойств сварных соединений в условиях высокочастотного нагружения (обзор)

Аннотация: Несмотря на то что сварка является наиболее распространенным способом соединения материалов, влияние высоких частот нагружения (высокочастотных вибраций) на усталостные характеристики и работоспособность сварных конструкций при их эксплуатации недостаточно изучено. Представленный нами обзор исследований усталостных свойств материалов, в том числе со сварными соединениями, в условиях высокочастотного нагружения позволит обобщить результаты исследований и расширить наши знания по данной тематике.

Ключевые слова: высокочастотные испытания, гигацикловая усталость, микроструктура, микротвердость.

Введение

В настоящее время в ряде отраслей промышленности, техники и транспорта (авиационное, железнодорожный и трубопроводный транспорт, энергетика) существуют конструкции и их элементы, в том числе и сварные, которые работают в условиях высокочастотных механических вибраций (колебаний), достигающих десятки и сотни килогерц. Отсюда возникает вопрос о прочности данных объектов и, следовательно, усталостные процессы, протекающие при высокочастотных нагрузках, вызывают особый интерес для изучения положительного и отрицательного их влияния, поскольку они не учитываются при стандартных циклических испытаниях (частота которых, как правило, составляет десятки герц).

Несмотря на довольно специфическое воздействие высокочастотных вибраций [5, 14, 24], усталостные явления, возникающие в процессе эксплуатации, при достаточно большой величине и длительности нагрузок такие же, как при низкочастотном нагружении. Однако определяемые при различных частотах нагружения характеристики усталостной прочности, скорости протекания процесса разрушения и сам процесс разрушения различаются. Поэтому усталостные испытания материалов, работающих в условиях высокочастотных вибраций, должны проводиться на этих же высоких частотах и в условиях, близких к эксплуатационным.

Цель настоящей работы – обобщение результатов исследований воздействия высокочастотных вибраций на усталостную прочность и долговечность сварных соединений материалов конструкций и элементов, работающих в области гигацикловой усталости.

Согласно статистике, усталостное разрушение сварных соединений составляет более 80% от общего количества и является наиболее опасным способом разрушения сварных конструкций [28]. Повреждения, полученные при воздействии высокочастотных нагрузок, могут усиливаться и скапливаться в концентраторах напряжений, которыми, в свою очередь, служат: раковины, поры, несплошности, смещение кромок относительно друг друга, геометрические неровности и другие, многие из которых образуются при формировании сварного соединения [2]. Кроме того, также неизбежно присутствие остаточных напряжений в результате пластической деформации, вызванной неоднородным тепловым расширением и фазовыми превращениями в твердом состоянии [10, 13], поэтому сварное соединение, работающее при высокочастотных нагрузках, требует детального изучения.

В соответствии с действующими стандартами испытания на усталость металлов ведутся до 10^6 циклов. Однако большинство современных исследований в этой области направлены на расширение испытательной базы до 10^9 циклов и выше – область VHCF (Very High Cycle Fatigue – область гигацикловой усталости) [11, 15–17].

Это обусловлено фактическим сроком эксплуатации (который зачастую превышает 10^6 циклов) как отдельных деталей, так и составных конструкций. Поэтому ученые в настоящее время исследуют область гигацикловой усталости, в частности величины предела выносливости и характер их изменения, который существенно отличается от стандартных. Последние достижения в этой области и рассматриваются в настоящем обзоре.

Область гигацикловой усталости

Гигацикловой усталости посвящен ряд исследований [18, 20, 23, 26 и др.]. Применение ультразвуковых усталостных машин значительно сокращает время тестирования до VHCF металлических материалов, кроме того, накапливает большой объем данных. Проведение испытаний позволяет определить предел выносливости материалов и изучить их поведение в области VHCF и выше, что другими методами осуществить практически невозможно. Расширение испытательной базы до 10^9 – 10^{11} циклов показывает, что кривая усталости имеет ступеньку (разрыв) в области обычного предела усталости (рис. 1) [1]. Это говорит о том, что концепция о существовании бесконечной долговечности при напряжениях ниже предела усталости неверна, а оценка на базе 10^6 – 10^7 не гарантирует предсказанной долговечности даже с использованием статического анализа [1].

Рис. 1. Кривая усталости стали SUJ2 (или ШХ15).

Кружки и квадраты – экспериментальные точки, полученные для образцов после шлифования и электрополировки соответственно; светлые и темные значки обозначают зарождение трещины на поверхности и под поверхностью образца [18].

В работе [3] изучался процесс зарождения поверхностных трещин в области VHCF низкоуглеродистых сталей с различным содержанием углерода. В качестве исследуемых материалов использовались стали марок: C15E, C45E, C60E. Результаты показали общее снижение

усталостной прочности на 20–30% [3] (рис. 2) в диапазоне от 10^7 и выше. Усталостная долговечность при высокочастотном нагружении имеет постоянную тенденцию к снижению. Анализ поверхности после разрушения показал, что снижение прочности материалов произошло за счет образования и развития усталостной трещины – преимущественно на поверхности образцов.

Рис. 2. Усталостная долговечность низкоуглеродистой стали при VHCF [3]:
красные точки – C15E, синие треугольники – C45E, черные квадраты – C60E; стрелками показана долговечность каждого материала.

Известно, что при различных частотах нагружения характеристики усталостной прочности, скорости протекания процесса разрушения и сам процесс разрушения различаются [21, 23]. На рис. 3 отражена усталостная долговечность легированной стали AISI 5140 при различных частотах нагружения в области VHCF [24]. Испытания проводились с использованием вращающихся гибочных (52,5 Гц) и ультразвуковых (20 кГц) машин. В обоих случаях испытательная база находилась в области 10^7 – 10^8 циклов (VHCF), с одинаковой тенденцией к снижению усталостной долговечности (см. рис. 5). Однако напряжения при высокочастотном нагружении выше, что обуславливается высокими скоростями процессов деформации.

Рис. 3. Кривая усталости легированной стали AISI 5140 при вращающемся изгибе с частотой нагрузки 52,5 Гц (а) и при VHCF – с частотой 20 кГц (б) [24].

На рис. 4 представлена кривая усталости высокопрочной стали SUJ2 при наложении двух методов: при вращающемся изгибе с частой нагрузки 52,5 Гц (белые точки) и высокочастотном нагружении с частотой 20 кГц (черные точки) в области VHCF [12]. Было установлено, что кривая усталости имеет ступеньку (разрыв) в области обычного предела усталости. Характер зависимости усталостной долговечности на 10^5 – 10^7 циклов при низкочастотных испытаниях отличается наличием площадки, тогда как при высокочастотном нагружении кривая

имеет постоянную тенденцию к снижению, что обусловлено различными скоростями нагружения. Разрушение при разных частотах нагружения также имеет свои особенности (рис. 4): в случае низких частот развитие трещины идет с поверхности, а при высокочастотном нагружении – от внутренних включений; данный вид зарождения и развития трещины носит название *fish-eye* [4, 6, 15, 19].

Рис. 4. Кривая усталости высокопрочной стали SUJ2 при вращающемся изгибе с частой нагрузки 52,5 Гц (белые точки) с наложенной кривой до VHCF с частотой 20 кГц (черные точки) [12].

Усталостные свойства сварных соединений в области Very High Cycle Fatigue при высокочастотном нагружении

Известно, что тепловые процессы, протекающие при сварке, вызывают изменения в микроструктуре и свойствах металла сварного шва и зоны термического влияния. В зоне сплавления, как правило, образуется множество дефектов и микротрещин, которые при действии высокочастотных нагрузок являются активаторами процесса зарождения трещин и последующего разрушения. На рис. 5 представлены результаты усталостных испытаний основного металла, зоны сварки и зоны термического влияния сварных соединений конструкционной стали Q345 в высокочастотном режиме в области VHCF [8]. Предел прочности испытываемого материала равен 570 МПа, предел текучести – 420 МПа. В результате усталостная прочность образцов сварных соединений (зона сварки и зона термического влияния) оказалась на 60% ниже относительно аналогичного показателя основного металла (рис. 5). Анализ поверхности усталостного разрушения с помощью электронной микроскопии показал, что снижение усталостной прочности материала произошло за счет образования дефектов при сварке [8, 10].

Рис. 5. Усталостные характеристики металла сварных швов из стали Q345: Base metal – основной металл, Welded joint – зоны сварки, HAZ – heat-affected zone – зоны термического влияния [8].

В работе [7] были проведены исследования усталостной прочности образцов из алюминиевого сплава AA7075–T651, полученных сваркой трением с перемешиванием в условиях усталостного высокочастотного нагружения в области VHCF. Механические свойства сплава:

предел прочности 462,3 МПа, предел текучести 435,7 МПа. Исследование производилось при помощи испытательной машины Shimadzu USF-2000 с частотой 20 кГц до 10^9 циклов нагружения. В результате усталостная прочность материала сварных образцов (welding joint) оказалась на 65% ниже по сравнению с алюминиевым сплавом AA7075 – T651 (base material) (рис. 6). Наибольшее число разрушений пришлось на зону термомеханического влияния.

Рис. 6. Усталостные характеристики: алюминиевого сплава – большие квадраты, материала сварных образцов – мелкие ромбы [7].

На рис. 7 представлены кривые усталости основного металла, зоны сварки и зоны термического влияния сварных соединений низколегированной стали в высокочастотном режиме в области VHCF [6]. Исследование производилось при частоте 20 кГц до 10^9 циклов нагружения. В результате усталостная долговечность металла под влиянием термического цикла сварки снизилась на 50–60% по сравнению с основным металлом. Предположительно инициирование усталостной трещины могло произойти по причине ухудшения механических свойств, а также изменения микроструктуры стали вследствие воздействия локального источника тепла в процессе сварки.

Рис. 7. Усталостные характеристики сварного соединения низколегированной стали [6]: треугольники – основной материал (base material), кружки – зона термического влияния (HAZ – heat-affected zone), квадраты – зоны сварки (solder).

В статье [4] в условиях высокочастотной усталости исследовалось поведение сварных соединений из алюминиевого сплава разных составов, с макроскопическими дефектами, появившимися в процессе сварки. На рис. 8,А показана область околосварного соединения: с левой стороны сварной шов граничит с основным металлом AIS5183 (AlMg4.5Mn0.7),

с правой – с алюминиевым сплавом EN AW6082 (AlMgSi1). В исследуемых сварных соединениях наблюдаются нежелательные эффекты сегрегации зерен (intercrystalline discontinuity), представленные газовыми порами (gas pores) в переходной зоне между сварным швом и основным материалом (рис. 8, Б). Эти микроструктурные изменения накапливаются на границах зерен и крайне негативно влияют на работоспособность в условиях монотонной и циклической нагрузки. Размеры пор в исследуемых образцах составляют от 0,1 до 0,9 мм. Результаты испытаний показали, что сварной шов по сравнению с зоной термического влияния и основным металлом является самым слабым элементом при высокочастотном циклическом нагружении (рис. 9). Его поведение, как правило, характеризуется инициированием трещины и последующим ее ростом, вызванным неоднородностями сварного шва (непровары и газовые поры).

Рис. 8. Микроструктурная неоднородность изучаемого сварного соединения: А – в зоне плавления; Б – в сварном шве. Intercrystalline discontinuity – сегрегация зерен, gas pores – газовые поры [4].

Рис. 9. Усталостные характеристики различных зон испытываемого сварного соединения в области VHCF [4]: треугольники – основной материал (base material) – алюминиевый сплав EN AW6082; квадраты – зона термического влияния (HAZ – heat-affected zone) алюминиевого сплава EN AW6082; кружки – сварной шов алюминиевого сплава AIS5183.

He Chao и Liu Yongjie в [9] исследовали поведение усталостных характеристик сварных соединений низколегированной конструкционной стали Q345 в области VHCF. Предел текучести испытываемого материала равен 420 МПа. В результате испытания было установлено, что по достижении VHCF усталостная прочность сварного шва и зоны термического влияния снижается на 60 и 55% соответственно по сравнению с основным материалом. Также установлено, что вероятность зарождения трещин в основном материале и в зоне термического влияния ниже, чем в зоне сварки. Это связано с тем, что усталостная трещина зарождалась непосредственно от дефектов в сварном шве.

Исследователи во главе с М. Zhu проводили циклические испытания сварного соединения 25Cr2Ni2MoV хром-ванадиевой группы (Cr–Ni–Mo–V) в области VHCF при частотах 110 Гц (машина магниторезонансного типа) и 20 кГц (ультразвуковая машина) [27]. Образцы изготавливались методом дуговой сварки под слоем флюса, с использованием присадочного материала, богатого никелем. В результате испытания (рис. 10) было установлено, что в случае 110 Гц 75% разрушений происходит в основном материале (BM part), а наименее подверженной усталостному разрушению оказалась зона сварки (WM part). Для частоты 20 кГц, напротив, приблизительно 60% зародившихся трещин находится в сварном шве, а основной материал и зона термического влияния в равной степени склонны к разрушению. Результаты исследования показали, что с повышением частоты нагружения от 110 Гц до 20 кГц изменяется зона преимущественного зарождения трещин: при низких частотах трещины зарождаются в основном металле, а с повышением частоты они начинают зарождаться в сварном шве и зоне термического влияния. Однако усталостная долговечность при низкочастотном и высокочастотном нагружении имеет одинаковую тенденцию к снижению (рис. 10).

Рис. 10. Усталостные характеристики сварного соединения стали 25Cr2Ni2MoV в области VHCF [27]: синие треугольники – результаты испытаний с частотой 110 Гц, зеленые – 20 кГц; светлые и темные значки обозначают зарождение трещины на поверхности и под поверхностью образца; зачеркнутые значки показывают усталостную долговечность.

Выводы

Гигацикловая усталость при высокочастотном нагружении сварных соединений в настоящее время вызывает большой исследовательский интерес, что связано с недостаточной осведомленностью о характере влияния высоких частот на усталостные характеристики и долговечность сварных соединений, работающих в реальных условиях эксплуатации (высокочастотные вибрации). Как показал предпринятый нами обзор, поведение сварных соединений (основной металл, зона термического влияния и сварной шов) в области VHCF при повышении частоты нагружения отличается от принятых стандартов: при достижении 10^7 циклов и выше наблюдается спад усталостной долговечности. Сварной шов является самым уязвимым местом конструкции: его усталостная долговечность снижается до 60% и служит очагом зарождения микротрещин, тогда как при стандартных методах испытаний он является наиболее надежным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности: монография. М.: Наука, 2008. 334 с.
2. Позняков В.Д., Довженко В.А., Касаткин С.Б., Максименко А.А. Микроструктурные особенности усталостной повреждаемости и способы повышения долговечности сварных соединений стали 09Г2С // Автоматическая сварка. 2012. № 5. С. 32–37.

3. Bach J., Möller J.J., Göken M., Bitzek E., Höppel H.W. On the transition from plastic deformation to crack initiation in the high and very high cycle fatigue regimes in plain carbon steels. *Intern. J. of Fatigue*. 2016;93:281–291.
4. Cremer M., Zimmermann M., Christ H.-J. High-frequency cyclic testing of welded aluminium alloy joints in the region of VHCF. *Intern. J. of Fatigue*. 2013;57:120–130.
5. Guocai Chai. Subsurface non defect fatigue crack origin and local plasticity exhaustion. 13th Intern. conf. on Fracture, June 16–21, Beijing, China. 2013;1:5188–5198.
6. He Chao, Huang Chongxiang, Liu Yongjie, Wang Qingyuan. Fatigue damage evaluation of low-alloy steel welded joints in fusion zone and heat affected zone based on frequency response changes in gigacycle fatigue. *Intern. J. of Fatigue*. 2014;61:297–303.
7. He Chao, Liu Yongjie, Dong Jiangfeng, Wang Qingyuan, Wagner Daniele, Bathias Claude. Fatigue crack initiation behaviors throughout friction stir welded joints in AA7075-T6 in ultrasonic fatigue. *Intern. J. of Fatigue*. 2015;81:171–178.
8. He Chao, Liu Yongjie, Fang Donghui, Wang Qingyuan. Very high cycle fatigue behavior of bridge steel welded joint. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*. 2012(3);2:5.
9. He Chao, Liu Yongjie, Tian Renhui, Wang Qingyuan. Gigacycle fatigue behaviors in Fusion Zone and Heat Affected Zone of Q345 LA steel welded joints. 13th Intern. conf. on Fracture, June 16–21, Beijing, China. 2013;1:2658–2667.
10. He Chao, Liu Yongjie, Wang Qingyuan. Very high cycle fatigue properties of welded joints under high frequency loading. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, Switzerland. 2013;647:817–821.
11. Hu Y., Sun C., Xie J., Hong Y. Effects of Loading Frequency and Loading Type on High-Cycle and Very-High-Cycle Fatigue of a High-Strength Steel. *Materials*. 2018(8);11:1456–1473.
12. Jeddi D., Palin-Luc T. A review about the effects of structural and operational factors on the gigacycle fatigue of steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2018(5);41:969–990.
13. Krasovskyy A., Bachmann D. Estimating the fatigue behavior of welded joints in the VHCF regime. *International Journal of Structural Integrity*. 2012;3:326–343.
14. Krasovskyy A., Virta A. Fracture mechanics based estimation of fatigue life of welds. *Proceedings of the XVII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM17)*. 2014;74:27–32.
15. Lei Z., Hong Y., Xie J., Sun C., Zhao A. Effects of inclusion size and location on very-high-cycle fatigue behavior for high strength steels. *Materials Science & Engineering*. 2012;558:234–241.
16. Liu X., Sun C., Hong Y. Crack initiation characteristics and fatigue property of a high-strength steel in VHCF regime under different stress ratios. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016;35:88–97.
17. Noriko Tsutsumi, Yukitaka Murakami, Véronique Doquet. Effect of test frequency on fatigue strength of low carbon steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Wiley-Blackwell. 2009(6);32:473–483.
18. Ochi Y., Matsumura T., Masaki K., Yoshida S. *Proceedings of the Internat. Conf. on Fatigue in the Very High Cycle Regime*, Vienna, Austria. Eds. S. Stanzl-Tschegg and H. Mayer. 2001;1:81–88.
19. Paolino D., Tridello A., Chiandussi G., Rossetto M. A general model for crack growth from initial defect in Very-HighCycle Fatigue. *Procedia Structural Integrity*. 2017;3:411–423.
20. Papakyriacou M., Mayer H., Pypen C., Plenk H., Stanzl-Tschegg S. Influence of loading frequency on high cycle fatigue properties of b.c.c. and h.c.p. metals. *Materials Science and Engineering*. 2001;308:143–152.
21. Peng Wen-jie, Xue Huan, Ge Rui, Peng Zhou. The influential factors on very high cycle fatigue testing results. *MATEC Web of Conferences* 165. 2018;1:9.
22. Shao C., Lu F., Li Z., Cai Y. Role of stress in the high cycle fatigue behavior of advanced 9Cr/CrMoV dissimilarly welded joint. *Journal of Materials Research*. 2016(2);31:292–301.
23. Shi J.-B., Li Y.D., Guo W. M., Xu N., Wu X.F., Zhao M., Ma H. On effect of hydrogen on very high cycle fatigue behaviours of high strength steels. *Materials Science and Technology*. 2013;29:1290–1296.
24. Sun C., Zhao A., Hong Y. Correlation of Crack Initiation Parameters with Life Estimation for Very-High-Cycle Fatigue of High Strength Steels. 2009(3);2:157–168.
25. Wagner D., Cavalieri F.J., Bathias C., Ranc N. Ultrasonic fatigue tests at high temperature on an austenitic steel. *Propulsion and Power Research*. 2012(1);1:29–35.
26. Xue H., Gao T., Sun Z., Zhang X. Fatigue crack initiation and propagation of 100Cr6 steel under torsional loading in very high cycle regime. 12th Intern. Fatigue Congress (FATIGUE 2018). *MATEC Web of Conferences*. 2018,165, 20003.
27. Zhu M., Liu L., Xuan F. Effect of frequency on very high cycle fatigue behavior of a low strength Cr–Ni–Mo–V steel welded joint. *Intern. J. of Fatigue*. 2015;77:166–173.
28. Zhu X., Jones J.W., Allison J.E. Effect of frequency, environment, and temperature on fatigue behavior of E319 cast-aluminum alloy: Small-crack propagation. *Metall. Mater. Trans.* 2008;1:2666–2680.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-1>

Gridasova E., Veretkovskiy A., Safariants A.

EKATERINA GRIDASOVA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: olvin@list.ruANDREY VERETKOVSKIY, Student, e-mail: veretkovskyandr@mail.ruALEXANDER SAFARIANTS, Student, e-mail: sanya.sinister@gmail.com

Department of Welding Engineering, School of Engineering

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Review of research of fatigue properties of welded joints under high-frequency loading

Abstract: Despite the fact that welding is the most common method of joining materials, the effect of high loading frequencies (high-frequency vibrations) on the fatigue characteristics and performance of welded structures during their operation is not well understood. Submitted by us review of studies of fatigue properties of materials, including those with welded joints, under high-frequency stressing conditions will help to expand our knowledge on this topic.

Keywords: high-frequency tests, gigacycle fatigue, microstructure, microhardness.

REFERENCES

1. Botvina L.R. Corruption: kinetics, phenomenon's, total mechanisms. Science, 2008, 334 p.
2. Poznyakov V.D., Dovzhenko V.A., Kasatkin S.B., Maksimenko A.A. Microstructural features of fatigue damage and ways to improve the durability of welded joints of steel 09G2S. Automatic welding. 2012;5:32–37.
3. Bach J., Möller J.J., Göken M., Bitzek E., Höppel H.W. On the transition from plastic deformation to crack initiation in the high and very high cycle fatigue regimes in plain carbon steels. Intern. J. of Fatigue. 2016;93:281–291.
4. Cremer M., Zimmermann M., Christ H.-J. High-frequency cyclic testing of welded aluminium alloy joints in the region of VHCF. Intern. J. of Fatigue. 2013;57:120–130.
5. Guocai Chai. Subsurface non defect fatigue crack origin and local plasticity exhaustion. 13th Intern. conf. on Fracture, June 16–21, Beijing, China. 2013;1:5188–5198.
6. He Chao, Huang Chongxiang, Liu Yongjie, Wang Qingyuan. Fatigue damage evaluation of low-alloy steel welded joints in fusion zone and heat affected zone based on frequency response changes in gigacycle fatigue. Intern. J. of Fatigue. 2014;61:297–303.
7. He Chao, Liu Yongjie, Dong Jiangfeng, Wang Qingyuan, Wagner Daniele, Bathias Claude. Fatigue crack initiation behaviors throughout friction stir welded joints in AA7075-T6 in ultrasonic fatigue. Intern. J. of Fatigue. 2015;81:171–178.
8. He Chao, Liu Yongjie, Fang Donghui, Wang Qingyuan. Very high cycle fatigue behavior of bridge steel welded joint. Theoretical & Applied Mechanics Letters. 2012(3);2:5.
9. He Chao, Liu Yongjie, Tian Renhui, Wang Qingyuan. Gigacycle fatigue behaviors in Fusion Zone and Heat Affected Zone of Q345 LA steel welded joints. 13th Intern. conf. on Fracture, June 16–21, Beijing, China. 2013;1:2658–2667.
10. He Chao, Liu Yongjie, Wang Qingyuan. Very high cycle fatigue properties of welded joints under high frequency loading. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, Switzerland. 2013;647:817–821.

11. Hu Y., Sun C., Xie J., Hong Y. Effects of Loading Frequency and Loading Type on High-Cycle and Very-High-Cycle Fatigue of a High-Strength Steel. *Materials*. 2018(8);11:1456–1473.
12. Jeddi D., Palin-Luc T. A review about the effects of structural and operational factors on the gigacycle fatigue of steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2018(5);41:969–990.
13. Krasovskyy A., Bachmann D. Estimating the fatigue behavior of welded joints in the VHCF regime. *International Journal of Structural Integrity*. 2012;3:326–343.
14. Krasovskyy A., Virta A. Fracture mechanics based estimation of fatigue life of welds. *Proceedings of the XVII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM17)*. 2014;74:27–32.
15. Lei Z., Hong Y., Xie J., Sun C., Zhao A. Effects of inclusion size and location on very-high-cycle fatigue behavior for high strength steels. *Materials Science & Engineering*. 2012;558:234–241.
16. Liu X., Sun C., Hong Y. Crack initiation characteristics and fatigue property of a high-strength steel in VHCF regime under different stress ratios. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016;35:88–97.
17. Noriko Tsutsumi, Yukitaka Murakami, Véronique Doquet. Effect of test frequency on fatigue strength of low carbon steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Wiley-Blackwell. 2009(6);32:473–483.
18. Ochi Y., Matsumura T., Masaki K., Yoshida S. *Proceedings of the Internat. Conf. on Fatigue in the Very High Cycle Regime*, Vienna, Austria. (Eds. S. Stanzl-Tschegg and H. Mayer). 2001;1:81–88.
19. Paolino D., Tridello A., Chiandussi G., Rossetto M. A general model for crack growth from initial defect in Very-HighCycle Fatigue. *Procedia Structural Integrity*. 2017;3:411–423.
20. Papakyriacou M., Mayer H., Pypen C., Plenk H., Stanzl-Tschegg S. Influence of loading frequency on high cycle fatigue properties of b.c.c. and h.c.p. metals. *Materials Science and Engineering*. 2001;308:143–152.
21. Peng Wen-jie, Xue Huan, Ge Rui, Peng Zhou. The influential factors on very high cycle fatigue testing results. *MATEC Web of Conferences* 165. 2018;1:9.
22. Shao C., Lu F., Li Z., Cai Y. Role of stress in the high cycle fatigue behavior of advanced 9Cr/CrMoV dissimilarly welded joint. *Journal of Materials Research*. 2016(2);31:292–301.
23. Shi J.-B., Li Y.D., Guo W.M., Xu N., Wu X.F., Zhao M., Ma H. On effect of hydrogen on very high cycle fatigue behaviours of high strength steels. *Materials Science and Technology*. 2013;29:1290–1296.
24. Sun C., Zhao A., Hong Y. Correlation of Crack Initiation Parameters with Life Estimation for Very-High-Cycle Fatigue of High Strength Steels. 2009(3);2:157–168.
25. Wagner D., Cavalieri F.J., Bathias C., Ranc N. Ultrasonic fatigue tests at high temperature on an austenitic steel. *Propulsion and Power Research*. 2012(1);1:29–35.
26. Xue H., Gao T., Sun Z., Zhang X. Fatigue crack initiation and propagation of 100Cr6 steel under torsional loading in very high cycle regime. 12th Intern. Fatigue Congress (FATIGUE 2018). *MATEC Web of Conferences*. 2018,165, 20003.
27. Zhu M., Liu L., Xuan F. Effect of frequency on very high cycle fatigue behavior of a low strength Cr–Ni–Mo–V steel welded joint. *Intern. J. of Fatigue*. 2015;77:166–173.
28. Zhu X., Jones J.W., Allison J.E. Effect of frequency, environment, and temperature on fatigue behavior of E319 cast-aluminum alloy: Small-crack propagation. *Metall. Mater. Trans.* 2008;1:2666–2680.