

UDC 620.178

Author: DEMCHENKO Maria Vyacheslavovna, Graduate student, Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Department «Technological Machines And Equipment»; 450062, Ufa, Kosmonavtov str. 1, Russia, masana-x@yandex.ru;

Author: SISANBAEV Albert Vasilovich, Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher in laboratory «Nanomaterials And Nanotechnologies», Department «Optical Microscopy», Institute for Metals Superplasticity Problems RAS; 450001, Ufa, Khalturin St. 39, Russia, sisan-av@yandex.ru;

Author: KUZEEV Iskander Rustemovich, Professor, Doctor of Engineering, Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Head of the Department «Technological Machines And Equipment»; 450062, Ufa, Kosmonavtov str. 1, Russia

RESEARCH OF STATE OF METAL WELDED JOINT BY DEFORMATION AND CORROSION SURFACE PROJECTION PARAMETERS

EXTENDED ABSTRACT:

At industrial enterprises in building structures and equipment one can see corrosion damage, as well as damage accumulated during operation period. The areas of stress concentration are welded joints as their structure is heterogeneous. From the point of view of the scale hierarchy, the welded joint represents the welded and base metal zones at the meso-macrolevel, the weld zone, the thermal zone, the base metal at the micro-mesolevel, the grain constituents at the nano-microlevel. Borders are the stress concentrators at different scale levels, thus they become the most dangerous places of metal structure. Modeling by the molecular dynamics method at the atomic level has shown nanocracks initiation in triple junctions of grain boundaries and on the ledges of the grain boundaries. Due to active development of nanotechnology, it became possible to evaluate the state of the weld metal at the nanoscale, where irreversible changes take place from the very beginning. Existing methods of nondestructive testing can detect damage only at the meso- and macrolevel. Modern equipment makes it possible to use other methods of control and approaches. For example, according to GOST R55046-2012 and R57223-2016, the analysis of the parameters of the surface projection deformation performed by confocal laser scanning microscopy should be taken into account when the evaluation of state of metal pipelines is carried out. However, there is a problem to monitor it due to various factors affecting the surface during operation. The paper proposes an additional method to estimate



the state of weld metal at any stage of deformation that uses 3D analysis of the parameters of the «artificial» corrosion relief of surface. During the operation period changes in the stress-strain state and structure of the metal take place, as the result the character and depth of etching of the grains of the structural components and their boundaries change too. Evaluation of the measurement results of the etching relief 3D surface reveals dangerous signs of the development of the critical state of metal on the nanoscale. The relationship between the method of corrosion surface relief and known methods studying the deformation relief of the surface and microhardness is presented.

Keywords: welded joint, corrosion relief of the surface, laser scanning microscopy, stress-strain state.

DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115

MACHINE-READABLE INFORMATION ON CC-LICENSES (HTML-CODE) IN METADATA OF THE PAPER

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br /><span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type">Research of state of metal welded joint by deformation and corrosion surface projection parameters</span> by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2017, Vol. 9, no. 5, pp. 98– 115. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115." property="cc:attributionName" rel="cc:attributionURL">Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R. </a> is licensed under a <a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a>.<br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-5-2017/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-5-2017/</a>.<br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="masana-x@yandex.ru" rel="cc:morePermissions">masana-x@yandex.ru</a>.
```

References:

1. *Sisanbaev A.V., Demchenko A.A., Demchenko M.V.* Eksperimental'noye modelirovaniye akkomodatsii v troynnykh stykakh obshchego tipa pri deformatsii trikristallov i nanokristallicheskikh struktur [Experimental modeling of accommodation in triple joints of a general type under deformation of tricrystals and nanocrystalline structures]. *Deformatsiya i razrusheniye materialov* [Deformation and destruction of materials]. 2012. № 9. pp. 2–6. (In Russian).
2. *Sisanbaev A.V., Demchenko A.A., Demchenko M.V.* Modelirovaniye akkomodatsionnykh protsessov v troynnykh stykakh nanokristallov s raznym razmerom zeren



- [Modeling of accommodation processes in triple junctions of nanocrystals with different grain sizes]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy]. 2012. Vol. 14. № 2. pp. 253–257. (In Russian).
3. *Sisanbaev A.V., Demchenko A.A., Demchenko M.V.* Experimental Simulation of the Accommodation in General Type Triple Junctions during the Deformation of Tricrystals and Nanocrystalline Structures. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013. No. 10. R. 738–741.
 4. *Ioffe A.F., Kirpicheva M.V., Levitskaya M.A.* Deformacia i prochnost kristallov [Deformation and Strength of Crystals]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Successes of physical sciences]. 1967. Vol. 93. № 2. P. 303–314. (In Russian).
 5. *Shanyavsky A.A.* Mashtabnyi urovni processov ustalosti metallov [Scale levels of metal fatigue processes]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical mesomechanics]. 2014. Vol. 17. № 6. P. 87–98. (In Russian).
 6. *Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D.* Priroda lokalizatsii plasticheskoi deformatsii tverdykh tel [The nature of localization of plastic deformation of solids]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics]. 2007. Vol. 77. Issues. 8. P. 62–69. (In Russian).
 7. *Karuskevich M.V., Korchuk Ye.YU., Yakushenko A.S., Maslak T.P.* Otsenka nakoplennoy ustalostnoy povrezhdeniya po nasyshchennosti i fraktal'noy razmernosti deformatsionnogo rel'yefa [Estimation of the accumulated fatigue damage by saturation and fractal dimension of the deformation relief]. *Problemy prochnosti* [Problems of Strength]. 2008. № 6. pp. 128–135. (In Russian).
 8. *Tukayev R.F., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V.* Korroziionnyi rel'yef poverkhnosti svarnykh shvov, poluchennykh elektrodugovoy i lazernoy svarkoy [Corrosion relief of welded joints obtained by arc and laser welding]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy]. 2015. Vol. 17. № 3. pp. 403–407. (In Russian).
 9. *Demchenko A.A., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Naumkin Ye.A., Kuzeev I.R.* Vzaimosvyaz' deformatsionnogo rel'yefa poverkhnosti i stepeni povrezhdennosti stali pri malotsiklovom nagruzhenii [Interrelation of the deformation relief of the surface and the degree of steel damage under low-cycle loading]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. [Chemical physics and mesoscopy]. 2012. Vol. 14. № 3. pp. 426–429. (In Russian).
 10. *Demchenko A.A., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R.* Issledovaniya fraktal'noy razmernosti deformatsionnoy poverkhnosti stali lazernym skaniruyushchim metodom [Investigations of the fractal dimension of the deformation surface became a laser scanning method]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*.



- [Chemical physics and mesoscopy]. 2012. Vol. 14. № 4. pp. 569-573. (In Russian).
11. *Demchenko A.A., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Naumkin Ye.A., Kuzeev I.R.* Issledovaniye vzaimosvyazi deformatsionnogo rel'yefa i stepeni povrezhdennosti stali [Investigation of relationship between the deformation relief and the degree of damage to steel]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory laboratory. Diagnosis of materials]*. 2013. Vol. 79. № 2. pp. 42–44. (In Russian).
 12. *Demchenko A.A., Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R.* Metodika issledovaniya fraktal'noy razmernosti deformatsionnoy poverkhnosti stali [The method to research fractal size of steel deformation surface]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Plant laboratory. Diagnostics of materials]*. 2013. Vol. 79. № 7-1. pp. 42–44. (In Russian).
 13. *Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R.* Metodika otsenki stepeni povrezhdennosti svarnykh soyedineniy v stali VSt3sp5 po izmeneniyu deformatsionnogo rel'yefa poverkhnosti [Method of evaluation of the degree of damage of welded joints in steel VSt3sp5 on changing the deformation surface relief]. *Ekspertiza promyshlennoy bezopasnosti i diagnostika opasnykh proizvodstvennykh ob'yektov [Industrial safety examination and diagnostics of hazardous production facilities]*. 2015. pp. 63–66. (In Russian).
 14. *Morozova L.V., Iskhodzhanova I.V.* Issledovaniye zakonomernostey izmeneniya rel'yefa poverkhnosti obraztsov iz alyuminiylituyevykh splavov metodom lazernoy mikroskopii [Investigation of surface relief transformation patterns for aluminum-lithium alloys samples by laser microscopy]. *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*. 2014. №10. Paper 08 (available at: www.viam-works.ru). (In Russian).
 15. *Iskhodzhanova I.V.* Primeneniye konfokal'noy lazernoy skaniruyushchey mikroskopii dlya resheniya materialovedcheskikh zadach [The use of confocal laser scanning microscopy for the solution of material science problems]. V sb. materialov VII Yevraziyskoy nauch.-praktich. konf. «Prochnost' neodnorodnykh struktur». M.: MISiS. [Proc. of the VII Eurasian Scientific Practical Conference «The strength of heterogeneous structures». Moscow: MISiS.]. 2014. 138 p. (In Russian).
 16. *Antonov A.A., Steklov O.I., Antonov A.A. (jr), Sidorin U.V.* Issledovaniye tekhnologicheskikh ostatochnykh napryazheniy v svarnykh soyedineniyakh magistral'nykh truboprovodov [Investigation of technological residual stresses in welded joints of trunk pipelines]. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii [Blank production in mechanical engineering]*. 2010. № 3. pp. 13–19. (In Russian).



17. *Dubov A.A.* Problemy otsenki ostatochnogo resursa stareyushchego oborudovaniya [Problems of estimating residual resource of aging equipment]. *Metody kontrolya i diagnostiki* [Methods of control and diagnostics]. 2012. 3 (78). pp. 74–78. (In Russian).
18. Otsenka ostatochnogo resursa dlitel'no ekspluatiruyemykh stal'nykh truboprovodov na osnove rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy obraztsov [Estimation of the residual life of long-lived steel pipelines based on the results of mechanical testing of samples]. *Natsional'nyy standart RF* [National Standard of the Russian Federation] (State Standard R55046-2012). Moscow, Standartinform. 2013. 12 p. (In Russian).
19. Otsenka sostoyaniya stal'nykh truboprovodov po parametram deformatsionno gorelyefa v protsesse ekspluatatsii [Evaluation of the state of steel pipelines in terms of deformation relief in the operation process]. *Natsional'nyy standart RF* [National Standard of the Russian Federation] (State Standard R57223-2016). Moscow, Standartinform. 2017. 9 p. (In Russian).
20. *Andronov I.N., Gavryushin S.S., Zakharenkov D.V., Pronin A.I.* Analiz vliyaniya defektov v zone svarnogo shva na prochnost' truboprovoda (Komp'yuternoye modelirovaniye) [Analysis of the influence of defects in the weld zone on the strength of the pipeline (Computer Modeling)]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye* [News of universities. Mechanical engineering]. 2011. № 1. pp. 5–10 (In Russian).
21. *Zakirnichnaya M.M., Kuzeyev I.R., Berdin V.K., Kirillova N.YU.* Okhrupchivaniye stali 20 v protsesse dlitel'noy ekspluatatsii [Embrittlement of steel 20 during long-term operation]. *Neftegazovoye delo* [Oil and gas]. 2006. Vol. 4, № 1. pp. 207–214. URL:<http://ngdelo.ru/article/view/1526> (In Russian).

DEAR COLLEAGUES!**THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:**

Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R. Research of state of metal welded joint by deformation and corrosion surface projection parameters. *Nanotekhnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2017, Vol. 9, no. 5, pp. 98–115. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115). (In Russian).



УДК 620.178

Автор: ДЕМЧЕНКО Мария Вячеславовна, аспирант каф. «ТМО», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов 1, Россия, masana-x@yandex.ru;

Автор: СИСАНБАЕВ Альберт Васильевич, канд. ф.-м. наук, с.н.с. лаб. «Наноматериалы и нанотехнологии», рук. подразделения «Оптическая микроскопия», ФАНО ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов РАН; 450001, Уфа, Россия, sisan-av@yandex.ru;

Автор: КУЗЕЕВ Искандер Рустемович, проф., д-р техн. наук, зав. каф. «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов 1, Россия

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПО ПАРАМЕТРАМ ДЕФОРМАЦИОННОГО И КОРРОЗИОННОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

АННОТАЦИЯ К СТАТЬЕ (АВТОРСКОЕ РЕЗЮМЕ, РЕФЕРАТ):

На промышленных предприятиях в строительных конструкциях, оборудовании наблюдаются повреждения от коррозии, а также повреждения, накопленные в процессе эксплуатации. Области концентрации напряжений являются сварные соединения, поскольку обладают разнородной структурой. С точки зрения масштабной иерархии сварное соединение представляет собой на мезо-макроуровне зоны наплавленного и основного металла, на микро-мезоуровне зоны сварного шва, термического влияния, основного металла, на нано-микроуровне зерна структурных составляющих. Концентраторами напряжений соответственно являются границы раздела на разных масштабных уровнях, представляющие собой наиболее опасные места металлоконструкции. Моделирование методом молекулярной динамики на атомарном уровне показало зарождение нанотрещин в тройных стыках границ зерен и на уступах границ зерен. С активным развитием нанотехнологий появилась возможность оценки состояния металла сварного соединения на наноуровне, где с самого начала происходят необратимые изменения. Существующие методы неразрушающего контроля позволяют выявить повреждения лишь на мезо- и макроуровне. Современное оборудование дает возмож-



В строительной и нефтегазовой отрасли аварийность конструкций при эксплуатации чаще всего связана с коррозией металла сварных соединений (СС) в агрессивных средах. Наблюдается неоднородность коррозионной стойкости разных зон и структурных составляющих металла СС. Например, для стали скорость коррозии феррита больше, чем перлита. Кроме того, в поликристаллическом материале наряду с зёрнами основным элементом структуры являются границы зёрен (см. рис. 1).

Границы зёрен по отношению к зёрнам являются исходными естественными дефектными зонами. Поэтому, при химическом травлении полированной поверхности металла в первую очередь вытравливается сетка границ зёрен. Образуется своеобразный рельеф травления. Наи-



Рис. 1. Классификация типов границ раздела СС на разных масштабных уровнях



большее травление наблюдается в области межфазных границ зерен. Это связано с большим свободным объемом в них по сравнению с однофазными границами зерен. Кроме того, при наличии внутренних напряжений в структуре металла при деформации наблюдается явление коррозионного растрескивания под напряжением. В работах [1–3] по моделированию на атомарном уровне методом молекулярной динамики было показано, что уже на начальной стадии деформации поликристалла наибольшая концентрация внутренних напряжений появляется в области границ зерен, расположенных под углом $\sim 45^\circ$ к оси растяжения (см. рис. 2). Структурно-механическая неоднородность СС по зонам (размер зерна, объемная доля фаз, остаточные напряжения и т.д.) в разной степени влияют на особенности развития коррозионных дефектов. Кроме коррозии к разрушению металлических конструкций приводят дефекты, накопленные в процессе эксплуатации. В работах [4–13] по прочности, усталости и пластической деформации металлов показана важность не только внутренних дефектов, но и дефектов на поверхности.

В процессе эксплуатации конструкций растет микроповрежденность металла. Опасным является состояние металла, когда на уровне нано- и микроструктуры произошли необратимые изменения. Существующие методы неразрушающего контроля позволяют выявить повреждения лишь на мезо- и макроуровне. Современное оборудование дает возможность использовать другие методы контроля и подходы [14–

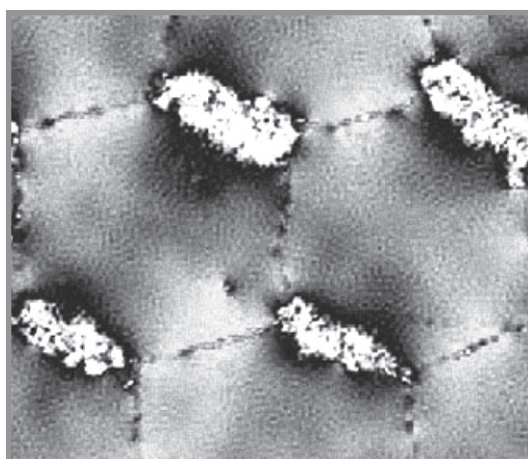


Рис. 2. Концентрация напряжений в области границ зерен поликристалла при деформации [1]



17]. Например, оценку состояния стальных трубопроводов в процессе эксплуатации рекомендовано [18, 19] проводить с учетом анализа параметров деформационного рельефа поверхности (ДРП), полученного методом лазерной сканирующей микроскопии. В связи с этим, разработка новых качественных и количественных методик неразрушающего контроля состояния СС конструкционной стали является актуальной задачей. Важно установить взаимосвязь неоднородности микроструктуры, микротвердости, ДРП и других параметров для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) и степени поврежденности металла.

В настоящей работе сравнительные исследования проводили для разных состояний металла СС: исходное, после эксплуатации и пластически деформированное (см. рис. 3). В качестве материала была выбрана сталь ВСтЗсп5. Образцы с СС изготавливали по ГОСТ 25.502-79 тип IV: МСС – модельный и РСС – резервуарный. Заготовки для МСС вырезали поперек направления проката из листа. Соединение получали сваркой листов по ГОСТ 8050. Образцы МСС отжигались в течение ~ 20 мин при $T_{\text{отж.}} \sim 923 \text{ К}$. Образцы РСС вырезали из сварных листов резервуара, который эксплуатировался в нефтегазовой отрасли ~ 35 лет.

Основные особенности и различия НДС металла образцов связаны с тем, что для МСС характерны структурные и технологические остаточные напряжения в разных зонах СС, а для РСС – накопленные дефекты после эксплуатации. Отжиг образцов РСС не проводился для сохране-

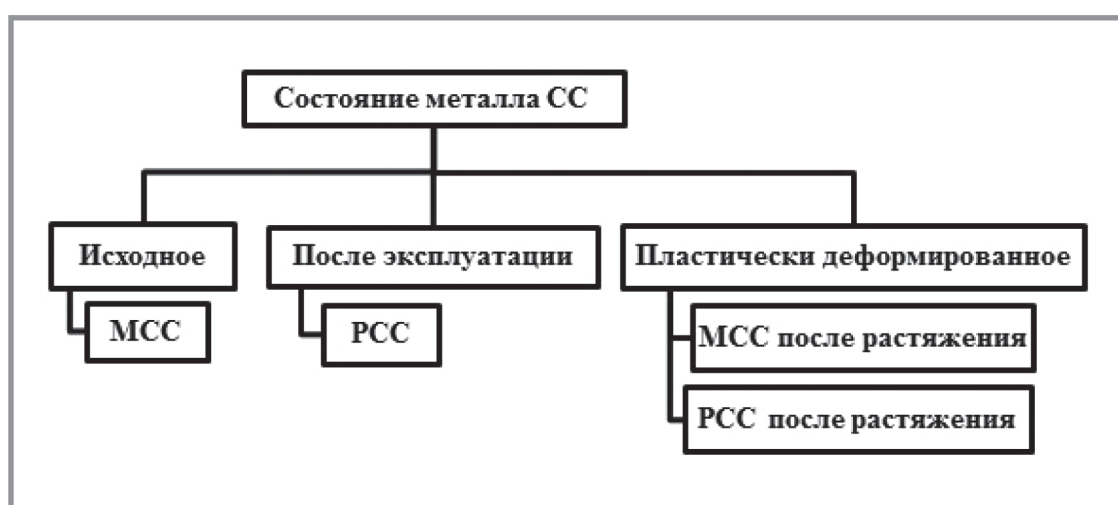


Рис. 3. Исследуемые состояния металла СС



ния в них эксплуатационного НДС. Исходную шероховатость всех образцов готовили на уровне $R_a \sim 0,2$ мкм, что гарантированно меньше, чем типичный диапазон ДРП $\sim 10...100$ мкм.

Пластически деформированное состояние металла получали путем статического растяжения образцов МСС и РСС до разрушения. Для обнаружения микротрещин в структуре, анализе НДС и коррозионной стойкости металла в разных зонах СС использовали разработанный нами метод анализа «наведенного» коррозионного рельефа поверхности (КРП) на любой стадии деформации [8]. Метод заключается в «нейтрализации» ДРП путем переполлировки поверхности металла и последующего травления для получения 3D-микроструктуры. Таким образом убирается «деформационный фон» в виде линий скольжения на поверхности металла. Это дает возможность более четко выявить НДС и накопленные микротрещины.

Параметры состояния КРП и ДРП в характерных зонах СС (СШ – сварной шов, ЗТВ – зона термического влияния и ОМ – основной металл) снимали на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе LSM-5-Exciter (Carl Zeiss, Germany) на разных масштабных уровнях. Для выявления координат границ раздела зон СС (СШ/ЗТВ и ЗТВ/ОМ), неоднородности развития деформационных мезополос и микротрещин в разных структурных областях применяли локальное (областями) и интегральное (полосой) сканирование образцов. Длина полосы сканирования зависела от геометрического размера СС, который связан с технологическими параметрами сварки. Приборная точность позиционирования шагового двигателя по оси Z составляла ~ 10 нм, при максимальном разрешении в плоскости XY ~ 100 нм. Возможности программы 3D-анализа изображений «ZEN» [8–13] позволяют определять важные параметры морфологии рельефа: размерные (R_a – среднее арифметическое отклонение профиля и R_z – высота неровностей профиля или размах профиля рельефа в пределах базовой длины) и безразмерные (R_{sk} – асимметрия и R_{ku} – эксцесс).

На рис. 4 показана характерная структура исходного состояния металла СС. По ней можно определять расстояния от центра СШ (помечено риской) до границ раздела зон СШ/ЗТВ и ЗТВ/ОМ.

На рис. 5 показаны характерные микроструктуры металла СС в области границы раздела ЗТВ/ОМ в исходном состоянии и после эксплуатации.



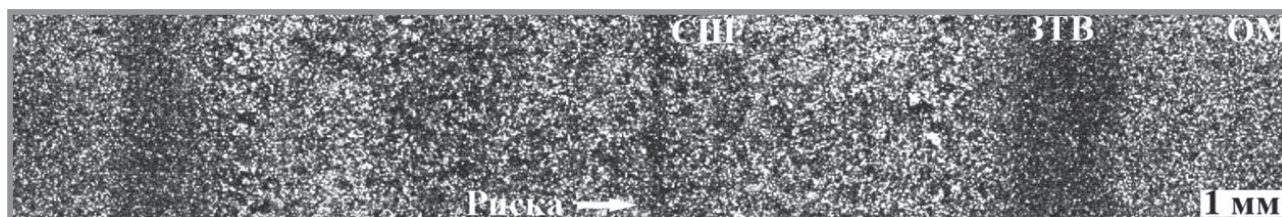


Рис. 4. Структура исходного состояния металла СС

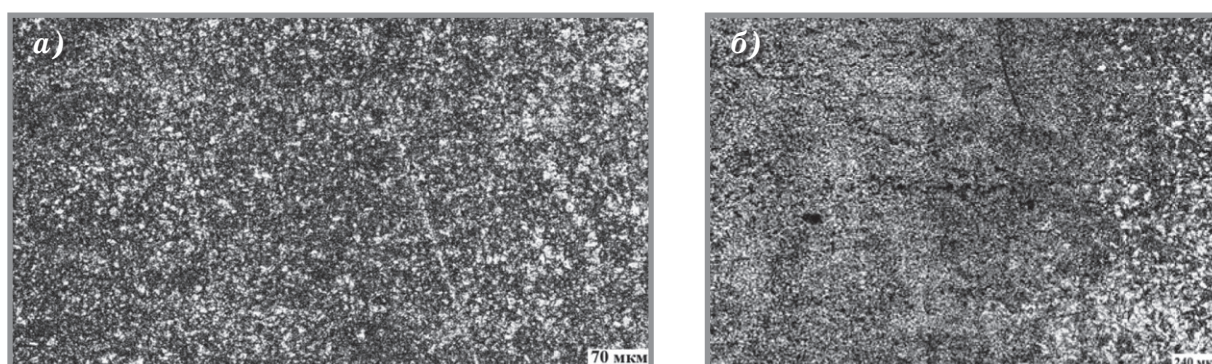


Рис. 5. Характерная микроструктура в области границы раздела ЗТВ/ОМ:
а) исходное состояние; б) после эксплуатации

Видно, что в отличие от исходного состояния в СС после эксплуатации присутствуют микротрещины, которые распространяются по сетке границ зерен ЗТВ. Кроме того, в работе по моделированию НДС в зонах СС [20] было показано, что максимальные эквивалентные напряжения наблюдаются на границе СШ/ЗТВ. Т.е. возникновение микротрещин на мезоконцентраторе (СШ/ЗТВ) наиболее вероятно.

На основании этого на рис. 6 представлена схема зарождения микротрещины от границы раздела зон СШ/ЗТВ и ее распространения по сетке границ зерен ЗТВ при эксплуатации СС.

Микротрещина распространяется по границам зерен ЗТВ, которые являются микроконцентраторами напряжений при эксплуатации СС. Когда на пути распространения микротрещины по мелкозернистой сетке границ зерен ЗТВ встречается более крупнозернистая структура зоны ОМ, то одновременно возможны разные («последовательные» и «параллельные») варианты аккомодации НДС в ЗТВ. В случае «последовательного» варианта аккомодации НДС в ЗТВ энергетически выгодно

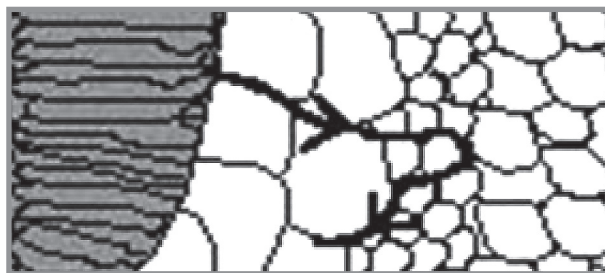


Рис. 6. Схема зарождения микротрещины от границы раздела зон СШ/ЗТВ и ее распространения по сетке границ зерен ЗТВ при эксплуатации СС

изменение вектора направления движения микротрещины обратно по сетке границ зерен ЗТВ, а не развитие сдвига в зерне ОМ. В случае «параллельного» варианта аккомодации микротрещина останавливается на границе ЗТВ/ОМ из-за недостаточного уровня концентрации напряжений. Далее идет инкубационный период накопления концентрации напряжений до критической величины. «Параллельно» с этим происходит зарождение новой микротрещины от границы СШ/ЗТВ в сторону ЗТВ. В обоих случаях граница раздела зон ЗТВ/ОМ явилась препятствием для дальнейшего роста микротрещины. С одной стороны, это не привело к образованию мезо- и макротрещин, а также дальнейшему развитию магистральных трещин. С другой стороны, это привело к повышенной плотности микротрещин в области ЗТВ и их «зигзагообразному» характеру развития.

На рис. 7 показано НV-распределение микротвердости по Виккерсу вдоль зон (от центра СШ через ЗТВ до ОМ) для разных состояний металла СС (см. рис.3): а) исходное и б) после эксплуатации, где L – расстояние от центра СШ.

Видно, что три характерных участка на зависимости микротвердости НV(L) геометрически совпадают с границами СШ/ЗТВ и ЗТВ/ОМ. Оказалось, что для обоих состояний металла СС микротвердость в СШ выше, чем в ЗТВ и ОМ. Для состояния металла СС после эксплуатации микротвердость выше, чем в исходном состоянии.

На рис. 8 показано КРП-распределение глубины травления h(L) вдоль зон для разных состояний металла СС.

Видно, что координаты границ ступенек на КРП-распределениях совпадают с координатами границ СШ/ЗТВ и ЗТВ/ОМ. Травимость зон в исходном СС отличается незначительно. Это означает, что химические



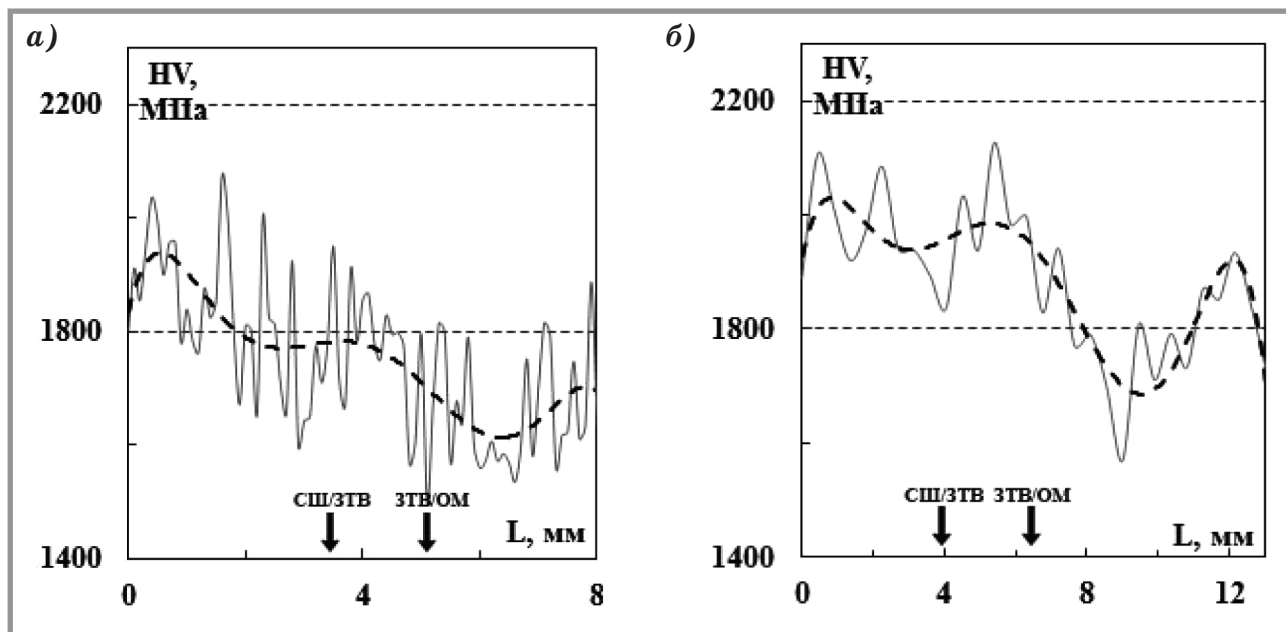


Рис. 7. HV-распределение микротвердости вдоль зон для разных состояний металла СС:
а) исходное; б) после эксплуатации

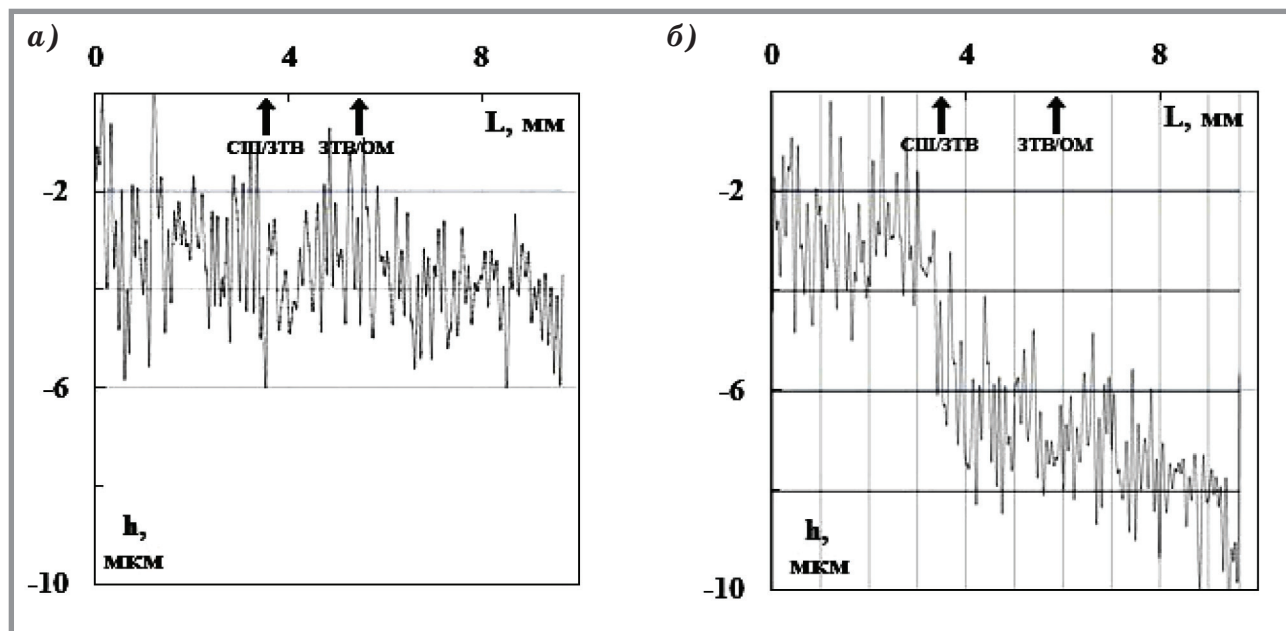


Рис. 8. КРП-распределение глубины травления зон для разных состояний металла СС:
а) исходное; б) после эксплуатации

свойства разных зон достаточно однородны. Для состояния металла СС после эксплуатации травимость зон ЗТВ и ОМ заметно больше, чем в СШ. Это может быть связано с разной степенью формирования НДС в зонах СС и изменениями структурно-фазового состава [21]. Для обоих состояний СШ травился одинаково. Однако травимость ЗТВ и ОМ после эксплуатации ~ 2 раза больше, чем в исходном состоянии.

На рис. 9 показано ДРП-распределение вдоль зон для пластически деформированного состояния металла в образцах МСС и РСС. Видно, что координаты границ ступенек на ДРП-распределениях совпадают с границами СШ/ЗТВ и ЗТВ/ОМ.

Величина аккомодационных сдвигов в СШ больше, чем в ОМ. Общий уровень ДРП больше в РСС, чем в МСС. По-видимому, это связано с большей степенью релаксации напряжений в виде значительных деформаций на поверхности металла. Для РСС образцов уровень напряжений может быть достаточно близким к критическим значениям сдвиговых напряжений. В целом, характер распределений микротвердости, КРП и ДРП по зонам СС хорошо коррелирует друг с другом.

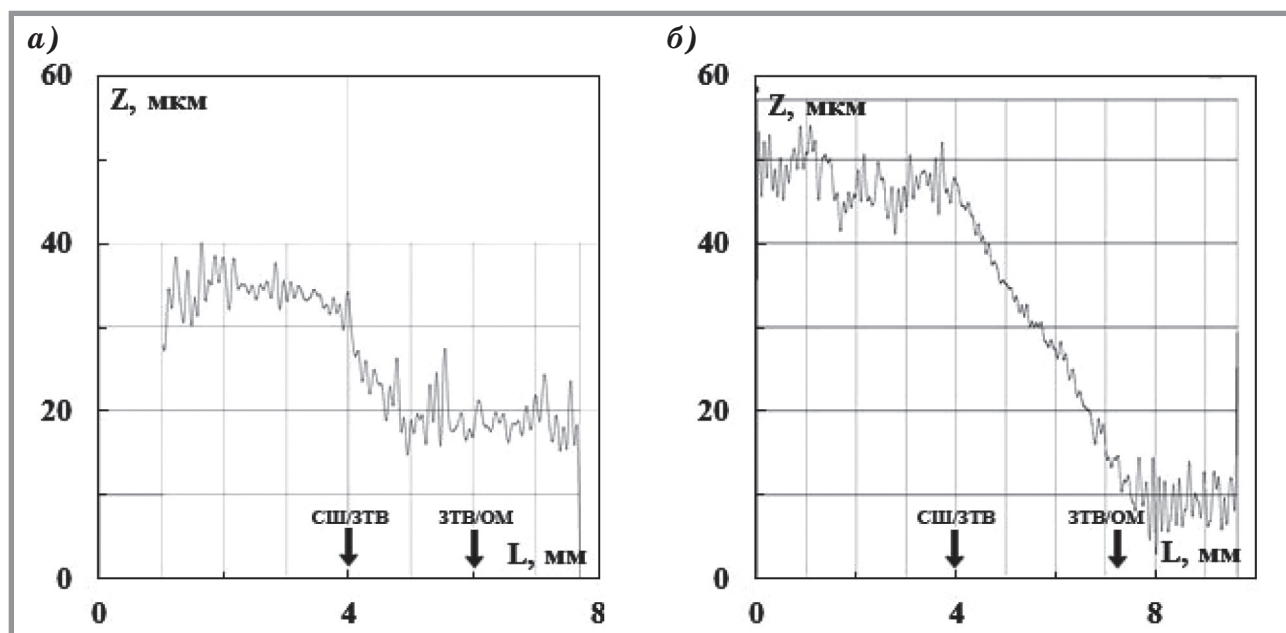


Рис. 9. ДРП-распределение Z-уровня зон для пластически деформированного состояния металла СС: а) МСС; б) РСС

Таким образом, моделирование НДС на атомарном уровне показало, что наиболее опасными местами концентрации напряжений являются не сами зерна, а границы зерен. Согласно этому, опасны в первую очередь не сами зоны сварного соединения, а границы зон и области раздела. Взаимосвязь микротвердости, коррозионного и деформационного рельефа поверхности для исходных и бывших в эксплуатации сварных соединений проявляется в характерной неоднородности их распределения по зонам. Наиболее резко неоднородность свойств зон сварного соединения проявляется после эксплуатации в виде переходной «ступеньки» в области ЗТВ. Метод 3D-анализа «наведенного» коррозионного рельефа поверхности позволяет оценить глубину микротрещины вблизи поверхности, а также напряженно-деформированное состояние сварного соединения по интенсивности травления разных структурных составляющих.

Библиографический список:

1. *Сисанбаев А.В., Демченко А.А., Демченко М.В.* Экспериментальное моделирование аккомодации в тройных стыках общего типа при деформации трикристаллов и нанокристаллических структур // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 9. – С. 2–6.
2. *Сисанбаев А.В., Демченко А.А., Демченко М.В.* Моделирование аккомодационных процессов в тройных стыках нанокристаллов с разным размером зерен // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 253–257.
3. *Sisanbaev A.V., Demchenko A.A., Demchenko M.V.* Experimental Simulation of the Accommodation in General_Type Triple Junctions during the Deformation of Tricrystals and Nanocrystalline Structures // Russian Metallurgy (Metally). 2013. No. 10. P. 738–741.
4. *Иоффе А.Ф., Курпичева М.В., Левитская М.А.* Деформация и прочность кристаллов // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 93, № 2. – С. 303–314.
5. *Шанявский А.А.* Масштабные уровни процессов усталости металлов // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17, № 6. – С. 87–98.
6. *Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д.* Природа локализации пластической деформации твердых тел // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, вып. 8. – С. 62–69.



7. Карускевич М.В., Корчук Е.Ю., Якушенко А.С., Маслак Т.П. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа // Проблемы прочности. – 2008. – № 6. – С. 128–135.
8. Тукаев Р.Ф., Демченко М.В., Сисанбаев А.В. Коррозионный рельеф поверхности сварных швов, полученных электродуговой и лазерной сваркой // Химическая физика и мезоскопия. – 2015. – Т. 17, № 3. – С. 403–407.
9. Демченко А.А., Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Взаимосвязь деформационного рельефа поверхности и степени поврежденности стали при малоцикловом нагружении // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 3. – С. 426–429.
10. Демченко А.А., Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Исследования фрактальной размерности деформационной поверхности стали лазерным сканирующим методом // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 569–573.
11. Демченко А.А., Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Исследование взаимосвязи деформационного рельефа и степени поврежденности стали // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 2. – С. 42–44.
12. Демченко А.А., Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Методика исследования фрактальной размерности деформационной поверхности стали // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79. – № 7-1. – С. 42–44.
13. Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Методика оценки степени поврежденности сварных соединений в стали ВСтЗсп5 по изменению деформационного рельефа поверхности // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. – 2015. – С. 63–66.
14. Морозова Л.В., Исходжанова И.В. Исследование закономерностей изменения рельефа поверхности образцов из алюминийлитиевых сплавов методом лазерной микроскопии // Труды ВИАМ. – 2014. – №10. – Ст. 08 (viam-works.ru).
15. Исходжанова И.В. Применение конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для решения материаловедческих задач / В сб. материалов VII Евразийской науч.-практич. конф. «Прочность неоднородных структур». – М.: МИСиС. – 2014. – С. 138.
16. Антонов А.А., Стеклов О.И., Антонов А.А. (мл.), Сидорин Ю.В. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 3. – С. 13–19.



17. *Дубов А.А.* Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования // Методы контроля и диагностики. – 2012. – 3 (78). – С. 74–78.
18. Оценка остаточного ресурса длительно эксплуатируемых стальных трубопроводов на основе результатов механических испытаний образцов // Национальный стандарт РФ (ГОСТ Р55046-2012). – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.
19. Оценка состояния стальных трубопроводов по параметрам деформационного рельефа в процессе эксплуатации // Национальный стандарт РФ (ГОСТ Р57223-2016). – М.: Стандартинформ, 2017. – 9 с.
20. *Андронов И.Н., Гаврюшин С.С., Захаренков Д.В., Пронин А.И.* Анализ влияния дефектов в зоне сварного шва на прочность трубопровода (Компьютерное моделирование) // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2011. – № 1. – С. 5–10.
21. *Закирничная М.М., Кузеев И.Р., Бердин В.К., Кириллова Н.Ю.* Охрупчивание стали 20 в процессе длительной эксплуатации // Нефтегазовое дело. – 2006. – Т.4, № 1. – С. 207–214. – URL:<http://ngdelo.ru/article/view/1526>.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

**ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕРИАЛА ДАННОЙ СТАТЬИ
ПРОСИМ ДЕЛАТЬ БИБЛИОГРАФИЧЕСКУЮ ССЫЛКУ НА НЕЁ:**

Демченко М.В., Сисанбаев А.В., Кузеев И.Р. Исследования состояния сварного соединения металла по параметрам деформационного и коррозионного рельефа поверхности // Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Том 9, № 5. – С. 98–115. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115).

DEAR COLLEAGUES!

THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:

Demchenko M.V., Sisanbaev A.V., Kuzeev I.R. Research of state of metal welded joint by deformation and corrosion surface projection parameters. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2017, Vol. 9, no. 5, pp. 98–115. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115). (In Russian).

**Контактная
информация:**

**Демченко Мария Вячеславовна
masana-x@yandex.ru**

