

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Материаловедение

УДК 53.09; 621.791

Моделирование повреждений сварных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации

М.С. Бисонг^{*}, В.В. Лепов^{**}, П.В. Сивцев^{***}, Н.И. Голиков^{**}, С.Н. Махарова^{**}

^{*}Университет Дуаля, БП 2701, Дуаля, Литториял Провинс, Камерун

^{**}Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия

^{***}Институт математики и информатики Северо-Восточного федерального
университета им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, 48, Россия
e-mail: mbellesabi@yahoo.com, lepov@iptpn.ysn.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального и численного моделирования влияния неоднородности и дефектов в сварном соединении стальных образцов на вероятность разрушения конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях, включая низкие температуры эксплуатации, тепловые удары, коррозию, ненадлежащее техническое обслуживание. Используются методы металлографического анализа, механических испытаний, измерения микротвердости, конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния и стохастическое моделирование роста трещины. Показано, что распределение и концентрация напряжений не всегда могут служить надёжным указателем мест вероятного разрушения конструкции. Неоднородности в виде сварных швов, обладающих отличающимися механическими характеристиками и содержащих дефекты в виде микропор и микротрещин, обуславливают ускоренное развитие повреждений и выход из строя узла конструкции и технической системы. В связи с этим для исключения случаев катастрофических разрушений и аварий сложных технических систем необходимо изменение существующего подхода к оценке опасности стальных конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях, и организация их постоянного мониторинга.

Ключевые слова: повреждение, сварной шов, зона термического влияния, модуль упругости, микротвердость, численное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, стохастическое моделирование, трещина, разрушение.

Damage Modeling of Weld Structures in Extreme Conditions

M.S. Bisong^{*}, V.V. Lepov^{**}, P.V. Sivtsev^{***}, N.I. Golikov^{**}, S.N. Makharova^{**}

^{*}University of Douala, Littorial Province, Douala, BP 2701, Cameroon

^{**}Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS,
1, Oktyabrskaya Str., Yakutsk, 677980, Russia

^{***}Institute of Mathematics and Informatics, North-Eastern Federal University
named after M.K. Ammosov, 48, Kulakovsky Str., Yakutsk, 677000, Russia
e-mail: mbellesabi@yahoo.com, lepov@iptpn.ysn.ru

Abstract. The experimental modelling and numerical analysis of stress-strain state and fracture of low-alloyed welded steel samples test has been considered. The mechanical tests include tension and low-cycling

BISONG Mbelle Samuel – преподаватель кафедры сварки; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., зам. директора; СИВЦЕВ Петр Васильевич – аспирант; ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич – к.т.н., в.н.с.; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., с.н.с.

fatigue of small welded steel probes. The mechanical heterogeneity has been estimated by the micro hardness test. The analysis include FEM of stress-strain state of inhomogeneity welded probes and stochastic modelling of cracks coalescence and growth. It has been shown that the stress and strain distribution could not be only criterion for estimation of possible failure places but it is necessary to take into account the inhomogeneity and defects in weld and heat affected zone also. Last ones are responsible for acceleration of damage accumulation and crack growth in steel structures. Thereby for exclude the catastrophic breakdown and failure of complex engineering systems the change of legacy approach to estimation of steel structures and organisation of constant surveillance are recommended. This research is beneficial to welders, modellers of structures, researches as a whole.

Key words: damage, steel welding, heat affected zone, elasticity modulus, microhardness, numerical modelling, FEM, stress-strain state, stochastic modelling, crack, fracture.

Введение

Ресурс технических систем в большинстве случаев определяется процессами накопления повреждений в стальных конструкциях, при этом критерием повышенной опасности становится не наличие в элементах и узлах зон наибольших напряжений и деформаций, а присутствие дефектов в виде неоднородностей, микропор и микротрещин, в частности, в зонах термического влияния и в самих сварных швах [1]. Влияние экстремальных условий эксплуатации, в частности, низких климатических температур, усугубляет процессы накопления повреждений, хотя влияние обычной многоциклового усталости и контактного износа при этом существенно снижается благодаря повышению механической прочности стали [2]. Ускоренный рост дефектов происходит за счет перехода материала при низких климатических температурах в зонах концентрации напряжений у вершин микротрещин и неоднородностей в хрупкое состояние [3].

Наибольший ущерб безопасности и экономической эффективности в таких условиях наносится транспортной и энергетической инфраструктуре – узлам локомотивов и железнодорожному полотну, магистральным трубопроводам, мостовым опорам, линиям электропередач, тепловым электростанциям и котельным. Особенно важной проблема становится при возведении новых стальных конструкций и необходимости изменения режимов и повышения интенсивности работы уже существующих технических систем.

В данной статье демонстрируются преимущества структурного подхода для оценки прочности и ресурса элементов конструкций и технических систем на основе концепции накопления повреждений и стохастического моделирования процессов разрушения [4–6]. В известных моделях, описывающих статическое нагружение вязких гетерогенных сред, не учитываются циклические и динамические воздействия, имеющие высокое значение для экстремальных условий эксплуатации, когда материал претерпевает

низкотемпературный вязкохрупкий переход [3]. Еще одним немаловажным фактором в этих условиях становится структурная неоднородность материала, вызываемая, например, наличием сварных соединений, которая приводит к непредсказуемому росту и ветвлению распространяющейся трещины.

Одна из наиболее частых поломок локомотивов – выход из строя колесной пары. Ресурс бандажей локомотивных колес при эксплуатации в условиях Центральной Якутии возможно оценить на основе теории накопления повреждений с учётом вязкохрупкого перехода в стали [6], а проблема учета дефектов в сварных соединениях стальных опор мостов решается путём экспериментального и компьютерного моделирования [7]. В статье показано решение последней проблемы путём конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния гладкого образца со сварным соединением при растяжении в упругой области, а затем стохастического роста трещины с экспериментально определенными параметрами и локальными механическими характеристиками металла в зоне сварки и зоне термического влияния (ЗТВ).

Материалы и оборудование

Сварные образцы изготавливались из листов стали СтЗсп толщиной 6 мм, сваренных ручной дуговой сваркой электродами диаметром 3 мм по стандартной методике с V-образной двухсторонней разделкой. Для механических испытаний на растяжение использовалась универсальная гидравлическая машина Z600, для испытаний на малоцикловую усталость – гидравлическая машина Instron 8802. Состав металла определялся на спектральном анализаторе «Spectroport-F».

В дальнейшем образцы были подготовлены для металлографического анализа структуры и неоднородностей. На рис. 1 показана микроструктура сварного образца № 7 с выделением зон основного металла (а), сварного шва (б) и зоны термического влияния (в). Фазовый состав

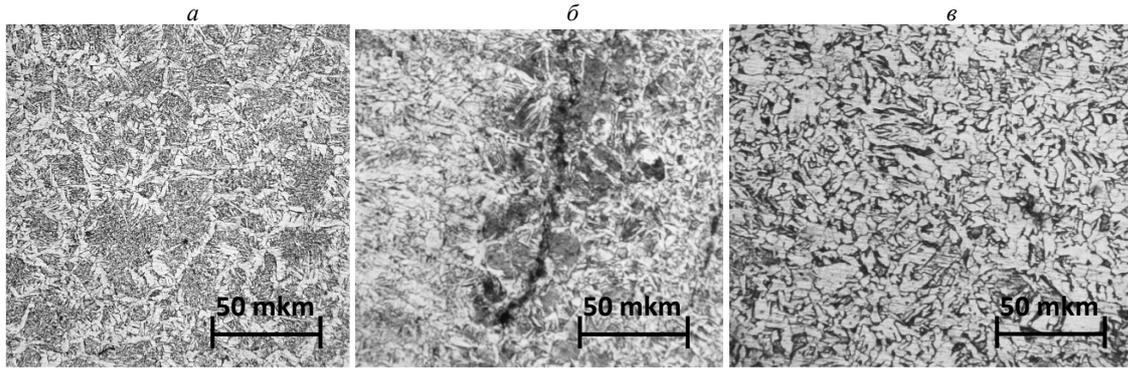


Рис. 1. Структура основного металла (а), сварного шва (б) и ЗТВ (в), ×500

металла определён как перлитно-ферритный в соотношении 20/80 соответственно. Металл сварного шва отличается более крупным зерном со средним размером 11–12 мкм (рис. 1, а), в отличие от основного металла (~7 мкм, рис. 1, в), вследствие процессов рекристаллизации, со столбчатой ферритно-перлитной структурой. Микроструктура ЗТВ (рис. 1, б) отличается видманштеттеновыми фигурами и наличием вследствие перегрева горячих трещин. Ширина ЗТВ составила около 1,5 мм, длина микротрещины в ЗТВ исследованного образца № 7 – 1,7 мм (рис.1, б). В зоне сварного шва также была обнаружена трещина размером 1,2 мм.

Результаты и обсуждение

Гладкие образцы со сварным швом были подвергнуты стандартным испытаниям на растяжение (табл. 1, образец № 6 изъят из-за дефекта) и малоцикловую усталость. Цикл усталостного нагружения был выбран отнулевым с амплитудой между определёнными экспериментально пределом текучести (330 МПа) и прочности (480 МПа) данной стали. Следует отметить, что стандартные характеристики стали СтЗсп обыч-

но несколько ниже экспериментально измеренных. Частота цикла была постоянной и равна 5 Гц до момента разрушения.

Таблица 1
Результаты испытаний на растяжение

№ образца	S ₀ , мм	L ₀ , мм	σ _{p^{0,2}} , МПа	σ _b , МПа	δ, %
1	84,08	52,00	328,35	484,50	22,18
2	85,67	52,00	322,08	477,24	20,95
3	73,92	52,00	314,62	488,12	23,55
4	84,16	52,00	335,97	482,68	21,72
5	80,67	52,00	335,90	485,46	25,93
7	83,21	52,00	323,45	484,79	21,83
8	85,91	52,00	318,22	479,69	20,91
9	83,37	52,00	340,22	485,18	23,20

На рис. 2 показана полученная кривая малоцикловой усталости.

В ходе испытаний все образцы, кроме одного, разрушились не в области сварного шва, а по основному металлу, что свидетельствует об отсутствии недопустимых дефектов. Однако один образец разрушился до достижения предела упругости в области ЗТВ.

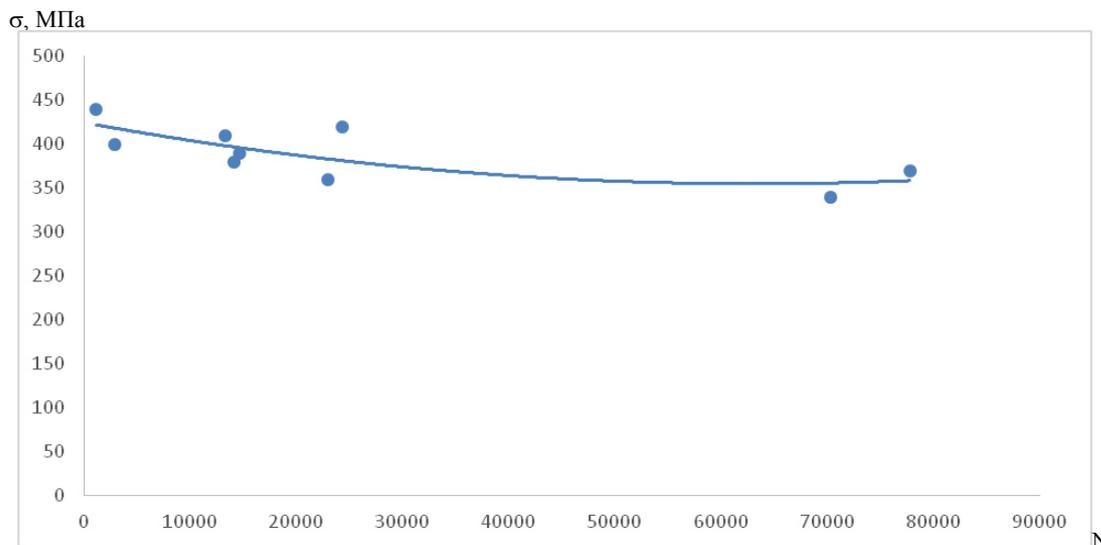


Рис. 2. Кривая малоцикловой усталости сварных образцов без надреза

Локальные механические характеристики в зоне сварного шва и ЗТВ определялись с помощью измерений микротвердости. Известны простое соотношение для предела прочности $\sigma_b = 3,5 \cdot \text{HV}$, а также эмпирическое соотношение для предела текучести $\sigma_b \sim 1,5 \cdot \sigma_T$. Результаты, показанные в табл. 2, в дальнейшем использованы в расчетах.

Т а б л и ц а 2
Предел текучести по данным микротвердости, МПа

№ образца	Зона сварки		ЗТВ	
	max	min	max	min
1	613,4	558,1	430,5	408,1
3	594,1	467,6	430,5	387,6
7	558,1	467,6	430,5	359,3

В дальнейшем проводилось моделирование напряженно-деформированного состояния трех сварных образцов с помощью свободно распространяемой программы моделирования методом конечных элементов FEniCS [8]. Общее распределение напряжений и деформаций для всех образцов показало, что концентрация происходит в эллиптической части около захвата, причём наибольшее значение напряжений достигалось для образца №1. Однако для того, чтобы исследовать влияние сварки и зоны термического влияния, более подробно была рассмотрена часть образца, представленная на рис.3 справа, с введением искусственных концентраторов напряжений в виде элементов с высоким модулем упругости, соответствующих измеренной твердости.

На рис.4 представлено характерное распределение напряжений при растяжении образцов №1, 3 и 7, при этом максимальное напряжение достигалось на границе между ЗТВ и сварным швом.



Рис. 3. Часть КЭ-модели для исследования зоны сварки и ЗТВ

Наибольшие напряжения в данном случае получены также для образца №1, в отличие от данных эксперимента, поэтому был сделан вывод, что разрушение произошло не от неоднородностей, вызванных сварным швом, а от дефектов в виде микротрещин, обнаруженных при анализе.

Поэтому выполнено стохастическое моделирование роста трещин в ЗТВ (и в основном металле) и сварном шве при растяжении образцов согласно разработанной модели. В качестве исходных данных использовались длины трещин, полученные экспериментально, и механические характеристики, согласно расчету по микротвердости. Визуализация роста трещины показана на рис.5. Несмотря на стохастический характер распределения длин трещин и расстояния между ними около выбранных средних величин, результаты моделирования показали существенные различия для двух зон. В сварном шве скорости роста трещины достигали значений 65 м/с, тогда как в зоне термического влияния – 0,35 м/с. Соответственно, энергия диссипации в зоне сварки оказывается во много раз меньше таковой в ЗТВ и основном металле, что и может служить причиной множества наблюдаемых аварий и катастроф технических систем после неправильного сервисного обслуживания, ремонта, возведения сварных стальных

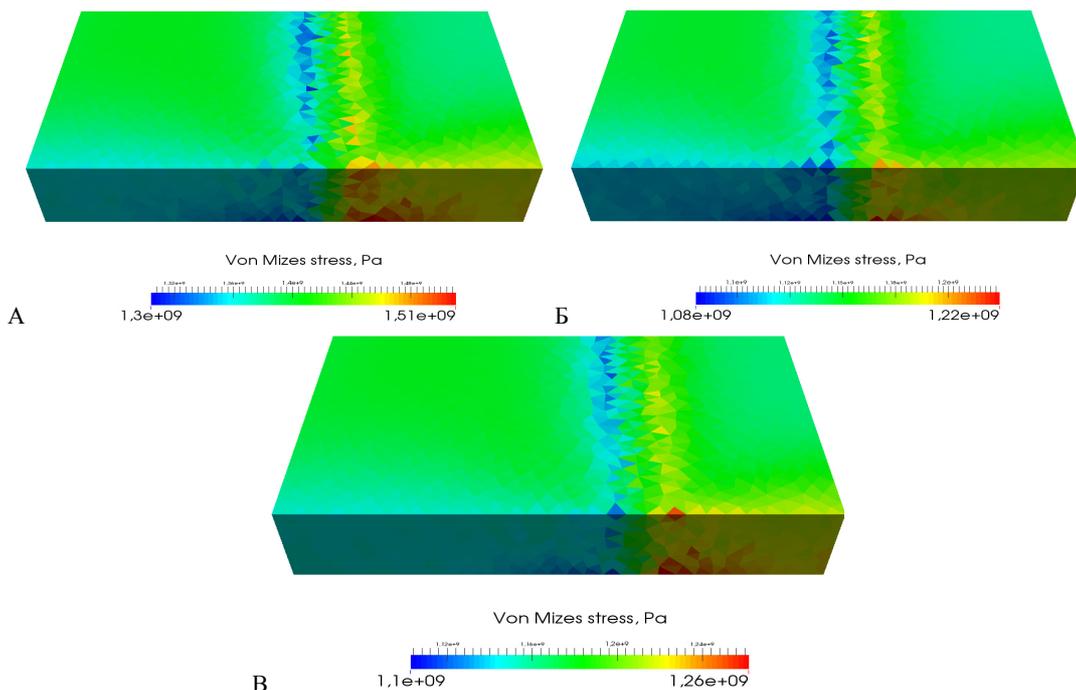


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений для образцов № 1, 3 и 7

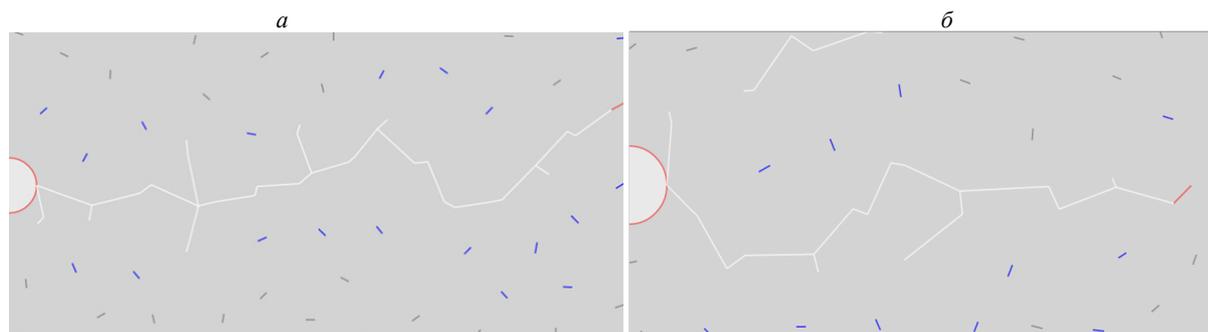


Рис. 5. Стохастическое моделирование роста трещины в зоне сварки (а) и в ЗТВ (б) для образца №7

конструкций даже с небольшими проектными нарушениями. Усугубляющим фактором при этом являются экстремальные условия эксплуатации технических систем на Севере.

Заключение

Таким образом, результаты экспериментального и компьютерного моделирования показали, что, несмотря на распределение напряжений и деформаций, указывающее зоны наибольшей вероятности разрушения, скорость роста трещины в зонах существенной неоднородности материала, содержащей микроскопические дефекты, может в несколько раз превышает таковую в неповрежденном материале. Экстремальные условия эксплуатации, такие как низкие температуры, температурные колебания, коррозия, ненадлежащее обслуживание и отсутствие постоянного мониторинга, увеличивают вероятность преждевременного разрушения объектов.

Можно сделать общий вывод, что для избежания хрупких катастрофических разрушений сварных конструкций протяженных технических систем в экстремальных условиях Севера необходимо, во-первых, снижать твердость материала, повышая его вязкостные характеристики при низких температурах, а, во-вторых, избегать неоднородностей и дефектов в виде зон перегретого металла и сварных швов с различного рода дефектами. Необходим систематический мониторинг объектов технической инфраструктуры, таких как крановые конструкции, железнодорожное полотно и локомотивная техника, магистральные трубопроводы и резервуары, мостовые пролеты и опоры, узлы тепловых электростанций и опоры электропередач. Для того, чтобы обнаруживать существенные неоднородности стальных конструкций, могут применяться методы неразрушающего контроля, такие как определение микротвердости поверхности в технологически доступных местах после ремонта, технического обслуживания и т.п., а также другие методы, например, магнитный, рентгеновский, тепловизионный. Более того, показанная методика может быть распространена

на и на конструкции, изготовленные из неметаллических, композиционных материалов.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда РФФИ (проект № №15-41-05010) и программы фундаментальных научных исследований государственного академий наук (проект Ш.28.1.1) с использованием оборудования ЦКП «Станция натурных испытаний» ИФТПС СО РАН.

Литература

1. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Лепова К.Я. Структурный подход к многомасштабному моделированию эволюционных процессов в материалах с внутренней микроструктурой // Наука и образование. 2015. № 4. С. 82–87.
2. Григорьев А.В., Лепов В.В., Тагров В.Н. Оценка ресурса элементов железнодорожной техники, эксплуатирующейся в условиях низких климатических температур // Наука и образование. 2014. № 1. С. 35–39.
3. Ачикасова В.С., Лепов В.В. Низкотемпературный вязко-хрупкий переход и внутреннее трение // Наука и образование. 2015. № 1. С. 75–77.
4. Broberg K.B. 1990, Computer demonstration of crack growth, *Int. J. Fracture* 42, 277–285.
5. Lepov V., Ivanova A., Achikasova V., Lepova K., 2007, Modeling of the damage accumulation and fracture: structural-statistical aspects, *Key Engineering Materials* 345–346, I, 809–812.
6. Lepov V., Grigoriev A., Achikasova V., Lepova K., 2016, Some Aspects of Structural Modeling of Damage Accumulation and Fracture Processes in Metal Structures at Low Temperature, *Modelling and Simulation in Engineering* 2016, 7178028.
7. Lepov V., Mbelle S.B. Microhardness and Elasticity Study of Fatigue Tested Weld Samples // *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. International Conference on Mechanical and Mechatronics Engineering (ICMME 2017)*, 2017, 8611.
8. Logg A., Mardal K.A., Wells G.N. Automated solution of differential equations by the finite element method, Springer, 2012.

Поступила в редакцию 02.08.2017