

# ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И МЕХАНИКА СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ

*В. А. Попов, д.т.н., академик ПТАН Украины, г. Харьков.*

*А. Е. Бармин, к.т.н., доцент кафедры материаловедения НТУ «ХПИ», г. Харьков.*

*Д. Г. Черный, начальник лаборатории технической диагностики и неразрушающего контроля ООО «ПромТехДиагностика», г. Кривой Рог*

Продолжение (начало в № 12 – 2019 и № 1÷4 – 2020)

*«Гораздо труднее увидеть проблему,  
чем найти ее решение»*

*Дж. Бернал*

*«Проблемы остаются, меняются лишь  
подходы к их решению»*

*Н. Бор*

В настоящее время на практике применяют два метода расчета кранов: **по допускаемым напряжениям** (The allowable stress method) и **по предельным состояниям** (The limit state method). Ранее считалось, что они равноценны. На самом деле это далеко не так, поскольку между ними есть принципиальные различия, которые в технической литературе (отечественной и зарубежной) по расчету кранов и в нормативных документах обычно не отражаются.

Первый метод основан на предположении, что наступление предельного состояния по прочности, устойчивости формы и положения, долговечности и т.п. можно предотвратить, подбирая соответствующий коэффициент запаса (коэффициент безопасности). Этот метод возник давно и получил распространение практически во всех областях техники. В последние годы он подвергался критике из-за недостатков, обуславливающих его противоречие с современными требованиями машиностроения вообще и краностроения в частности. Основной его недостаток – отсутствие целевой ориентации расчета. Конструктор рассматривает расчетные и допускаемые напряжения или нагрузки как определенные величины. Но как видно из приведенных примеров (рис. 23, 24 в ПССТ №4/2020) это далеко не соответствует действительности. Более того, на основе этого метода расчета принципиально невозможно определить вероятность разрушения крановой металлоконструкции из-за ряда причин, при которых происходит преждевременное начало трещинообразования [5].

В методе расчета по предельным состояниям нагрузки и сопротивления конструкций машин и сооружений признаются случайными процессами и/или величинами.

Вместе с тем, еще в 80-х годах прошлого столетия немецкие ученые пришли к выводу о необходимости совершенствования методов расчета по кранам мостового типа, в т.ч. и метода по предельным состояниям [19], т.к. в процессе эксплуатации происходят изменения прочностных характеристик металла в элементах конструкции, в т.ч. от влияния теплового воздействия при сварке.

По мере применения и совершенствования метода расчетов по предельным состояниям в ведущих европейских странах (Германия, Великобритания, Франция) впервые был признан факт,

что расчет по предельным состояниям, в отличие от расчета по допускаемым напряжениям, учитывает **случайную изменчивость нагрузок**.

Также впервые признана неравноценность методов расчета кранов по допускаемым напряжениям и по предельным состояниям. Применение метода допускаемых напряжений, рассматриваемого как частный случай расчета по предельным состояниям, было ограничено кранами, конструкции которых являются линейно-упругими системами. И лишь через 10 лет после многолетнего практического применения и дополнительных исследований в 1998 году был утвержден международный стандарт ISO 2394 [20].

Если сравнивать такой подход к вопросам безопасности эксплуатации ОПО в Европейских странах, с безответственным скандально известным Постановлением Кабинета Министров Украины № 695 от 09.12.2014г., отменившим «одним махом» все межгосударственные стандарты, применявшиеся до 1992 г. под предлогом – «устаревших», то надо отметить, что кроме ХАОСА в нормативной базе в вопросе перехода на «рельсы» международных стандартов за прошедшие 5 лет ничего не произошло.

В стандарте ISO 2394 формализовано определение предельного состояния, при этом допускается два возможных формата расчета: **вероятностный и частичных коэффициентов**. Формат частичных коэффициентов используется в обычных случаях, вероятностный может быть удобен при решении специальных проблем проектирования, а также для калибровки частичных коэффициентов. Но при этом, рассматривая возможное (вероятностное) сочетание и изменения нагрузок в процессе эксплуатации в расчетах так и не принимается во внимание наличие напряжений от теплового воздействия при сварке элементов конструкции как в самом сварном шве, так и в целом в сварной металлоконструкции. В результате чего искажается реальная картина нагружения, связанная с масштабным фактором.

После Чернобыльской катастрофы проблемам, связанным с необходимостью оценки остаточных напряжений, стало уделяться значительное внимание на международных форумах, конференциях и в научно-технической литературе. Но из-за бюрократической инерции мышления в вопросах

совершенствования нормативной базы в практическом плане ничего не изменилось.

Вместе с тем, в международных стандартах проблеме негативного влияния остаточных сварочных напряжений при оценке риска эксплуатации сварных конструкций уделяется значительное внимание.

Так, анализируя рекомендации стандарта EN1011-2:2001 по сварке стальных конструкций [16] и формулы 1 – 6, 13 – 17 (ПССТ №2, 3 /2020), необходимо отметить, что риск возникновения трещин зависит не только от химсостава применяемых сталей, но и от изменения величины зерна (особенно в околошовной зоне), наличия закалочных структур, а также от содержания водорода в сварном шве. Не надо забывать, что в процессе сварки в жидком металле происходят те же процессы, как и при производстве стали с выделением газов из жидкого металла, а также такие же структурные фазовые превращения в металле шва, как и при заливке и остывании металла в изложницах, но только в более экстремальных условиях (значительно высоких температурах и быстром затвердевании).

Образование водорода при сварке может получиться в результате химической реакции:  $Fe + H_2O \rightarrow FeO + H_2$ . Поэтому в стандарте EN1011-2:2001 устанавливаются требования к хранению, сушке и просушиванию электродов и присадочных материалов, а также вводится такое понятие, как **водородный показатель**, используемый для любого процесса дуговой сварки. Значения водородного показателя зависят в основном от содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и должны соответствовать предельным нормам. Особенно это важно при выборе температуры предварительного подогрева и поддержания межслойной температуры (температуры между проходами) при сварке толстостенных элементов конструкций.

При снижении температуры жидкого расплава растворимость газа в металле уменьшается, особенно при переходе металла из жидкого состояния в твердое.

Водород способствует образованию закалочных структур вблизи оксидных включений, коэффициент термического расширения которых меньше чем у стали, из-за чего при охлаждении образуются зоны с повышенными термическими напряжениями. С другой стороны, из-за того что коэффициент термического расширения сульфидных включений больше, чем у стали и, соответственно, при быстром охлаждении возле сульфидов образуются микропустоты, в которых скапливается диффузионный водород. Таким образом, внутренние напряжения в сварных швах могут достигать до 600 МПа [1]. При этом может происходить **задержанное разрушение** при остаточных напряжениях после сварки ниже предела текучести стали.

В рекомендациях стандарта EN1011-2:2001 для предотвращения водородных трещин (также известных, как закалочные трещины) приводятся

для практического применения ряд графических зависимостей: от толщины пластин, мм; теплоподвода, кДж/мм; минимальной температуре подогрева, °С для различных значений углеродного эквивалента.

Вместе с тем, рассматривая вопрос о предотвращении водородных (закалочных) трещин, разработчики стандарта EN1011-2:2001 [16] отмечают: *“...Эти рекомендации применимы только к нормальным условиям изготовления при обычных внутренних напряжениях. В условиях с более высокими внутренними напряжениями, может потребоваться и более высокая температура предварительного нагрева или другие меры предосторожности, чтобы предотвратить появление водородных трещин...”*. При этом в стандарте отмечается, что могут быть использованы другие альтернативные методы, при условии, что их эффективность подтверждена. **А определение уровня температуры предварительного нагрева для предотвращения водородных трещин критически зависит от точного знания состава основного металла и углеродного эквивалента, а также от состава наплавляемого металла.**

Конечно, ни какими методами расчетов на стадии проектирования влияние сварочных напряжений для различных конструктивных решений невозможно предусмотреть. Но в инструкциях по эксплуатации можно обратить внимание «Заказчика» на необходимость контроля напряженно-деформированного состояния с применением того или иного метода неразрушающего контроля.

С развитием неразрушающих методов контроля стало возможным оценивать сварочные напряжения как в сварных швах, так и в металлоконструкциях.

И хотя, наконец-то, в некоторых отраслевых документах (тепловая и атомная энергетика, химическое машиностроение и другие отрасли) появилось требование о необходимости проведения **контроля и снятия остаточных сварочных напряжений**, но как правило, это требование не выполняется по ряду причин, в т.ч. отсутствия достаточно эффективных методов неразрушающего контроля.

В краностроительной отрасли даже появилось (непонятно на каком основании) выражение: «...обеспечивается технологией...». Но как показал анализ результатов широкомасштабного эксперимента по внедрению магнитной структуроскопии металлоконструкций кранов для предприятий горно-металлургического комплекса (2004-2012 гг.), эти утверждения не соответствуют действительности при отсутствии эффективного контроля еще на стадии изготовления кранов [5].

Вместе с тем, на предприятиях ВПК СССР вопросы оценки риска, связанные с наличием остаточных напряжений в стальных конструкциях, в какой-то мере были решены задолго до Чернобыльской катастрофы.

Например, при оценке сварочных напряжений в сварном шве и околошовной зоне на одном из предприятий ОАО Центр судоремонта «Звездоч-

ка», специализирующимся на ремонте и модернизации подводных лодок и надводных кораблей на основе многолетних исследований была разработана технология и создан сканер-дефектоскоп магнитоанізотропный «Комплекс – 2.05» (рис. 26).



Рис. 26 Внешний вид пульта для настройки и считывания изображений устройства «Комплекс – 2.05»

Критерием для определения предела прочности металла является не превышение максимумом концентратора напряжений определенного прочностного предела. Количественная характеристика критерия основана на равенстве полуразности главных механических напряжений (РГМН). Прибор позволяет выполнить измерение РГМН, а, следовательно, обеспечивает контроль не только напряженного, но и прочностного состояния металла согласно критерию Треска. Именно этот принцип использован в сканере – дефектоскопе «Комплекс – 2.05».

Этот прибор позволяет оперативно представлять на персональном компьютере результаты контроля в виде карт разности главных механических напряжений (РГМН) и их коэффициента концентрации.

В работе [1] приведены фрагменты результатов измерений напряженного состояния в сварном шве, предварительно прошедшем рентген контроль и УЗК на отсутствие дефектов: до термообработки (рис. 27), после термической обработки (рис. 28), а также после проведения ультразвуковой обработки отдельных зон участка конструкции (рис. 29) с применением ультразвукового комплекса «Шмель – 2».

Даже визуально сравнивая изменение линий на рис. 27 – 29 с точками концентрации механических напряжений (КМН) в координатной сетке расположения зон с изменением напряжений, можно сделать вывод: в результате ультразвуковой ударной обработки полностью ликвидированы опасные значения градиента РГМН, т.е. полностью исчезли условия спонтанного трещинообразования и формирования линий скольжения. Кроме того, максимальные значения РГМН по сравнению с их первоначальным уровнем снизились более чем в два, три раза (рис. 29). Заметим, что остаточные напряжения – фактор, существенно влияющий на ресурс конструкции,

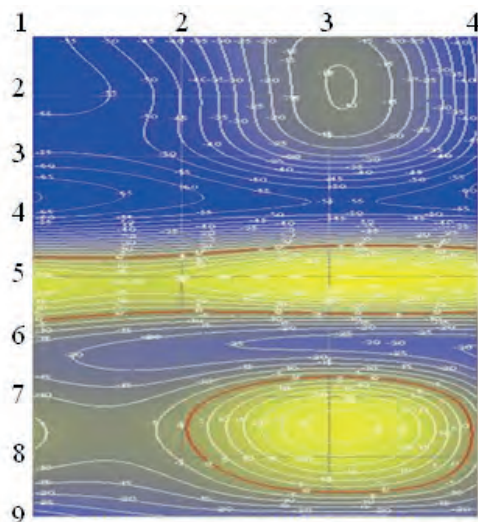


Рис. 27 Распределение РГМН до проведения операций снятия механических напряжений

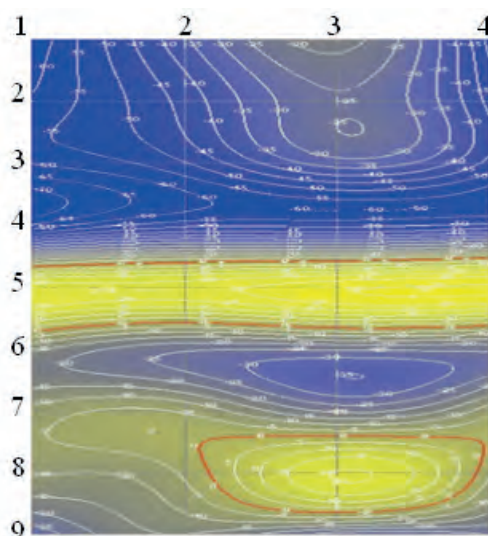


Рис. 28 Распределение РГМН после проведения операций термической обработки для снятия градиента механических напряжений

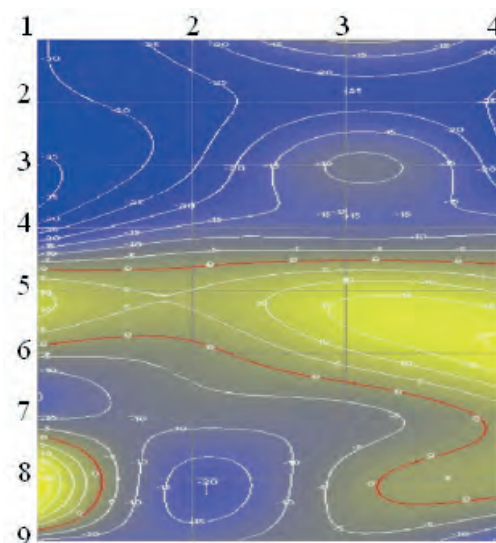


Рис. 29 Распределение РГМН после проведения ультразвуковой обработки отдельных зон участка конструкции.

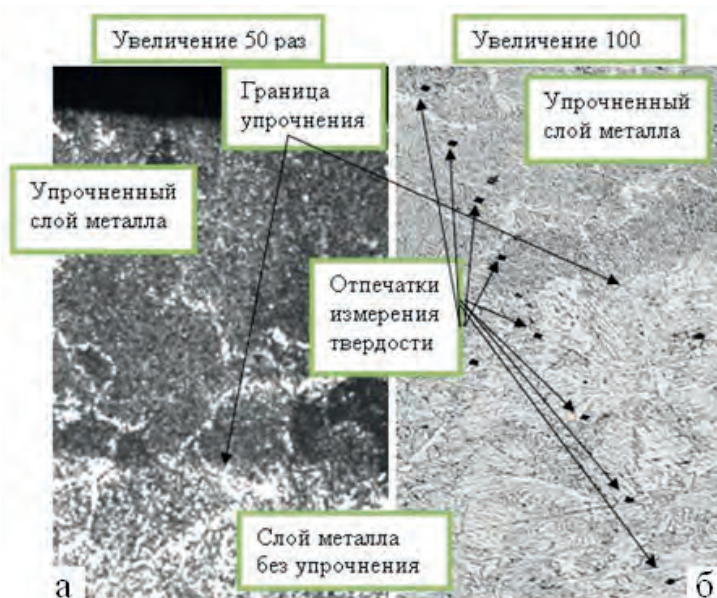


Рис. 30 Микроструктура: а – околошовной зоны; б – сварного шва

который до применения приборов типа «Комплекс – 2.05», практически учитывался исключительно «умозрительно» или на основе статистических эмпирических данных.

Слой, упрочненный ультразвуком ударным методом обработки, распространяется на глубины 150 – 170 микрон. Зерно в упрочненном слое становится более мелким.

На основании многолетних исследований для оценки о последующем принятии решения по ремонтно-восстановительным работам в кораблестроении Морским Регистром РФ была разработана инструкция «Контроль и ультразвуковая релаксация остаточных сварочных концентраторов напряжений, возникающих в процессе ремонта и изготовления металлических конструкций и изделий».

Таким образом, этот метод стал применяться:

– для выявления областей концентрации механических напряжений (КМН), обусловленных дефектами типа нарушения сплошности металла и инородных включений;

– обнаружения концентраторов концентрации механических напряжений иной природы;

– определения положения границ остаточных сварочных напряжений и остаточных пластических деформаций околошовной зоны и местных аномалий.

Вместе с тем, если в зоне измерений имеется дефект (обнаруженный рентгеном или ультразвуком), не создающий существенного возмущения поля механических напряжений (т.е. не являющийся концентратором напряжений в данный момент), он не будет заметен на картах. В то же время, любой концентратор механических напряжений независимо от его размеров является зародышем будущего дефекта, не обнаруживаемый методами традиционной дефектоскопии, будет обнаружен на картах РГМН.

Рассматриваемый метод диагностики сварных соединений может быть использован самостоятельно, а при необходимости подтверждения природы выявленной концентрации напряжений (уточнения вида дефекта, обусловившего рост КМН) применяется в сочетании с другими разрушающими и неразрушающими методами контроля.

Тем не менее, он далеко недостаточен для решения проблем достоверной оценки напряженно-деформированного состояния сварных конструкций, работающих в условиях циклического нагружения.

#### Литература

1\*. Попов В.А., Гудошник В.А. На тернистом пути экспертизы промышленной безопасности. — Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2016. — 544 с.

5. Попов В.А., Радченко В.С. Комплексный подход при анализе причин раннего трещинообразования // Подъемные сооружения. Специальная техника №10-12, 2018.

16. Европейский стандарт EN 1011-2:2001. Сварка. Рекомендации по сварке металлических материалов. Часть 2: Дуговая сварка ферритных сталей. // Немецкая редакция EN 1011-2:2001.

19. Hannover, Hans-Otto. Die Entwicklungstrends bis Produkt der Kran und Hebetchnik // Förder und Heben, – 1984, – Vol. 34, Iss. 1. – P. 35-39.

20. ISO 2394:1998 “General principles on reliability for structures, IDT”.

**Продолжение следует.**

\*На основе личного многолетнего опыта технического диагностирования подъемных сооружений авторами детально рассмотрены:

- вопросы технического диагностирования металлоконструкций кранов мостового типа;
- процессы зарождения и развития макродефектности в металле и сварных соединениях крановых металлоконструкций в условиях статического и циклического нагружения;
- комплексный подход к оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций с применением магнитной структуроскопии при анализе риска дальнейшей эксплуатации грузоподъемных машин, отработавших нормативный срок;
- расчетно-аналитических процедур на основе современного компьютерного моделирования.

Это полезное пособие для руководителей и специалистов:

- экспертных организаций;
- краностроительных предприятий и проектных институтов;
- организаций, занимающихся ремонтом, реконструкцией (модернизацией) подъемных сооружений;
- преподавателям, студентам и аспирантам высших учебных заведений.



Попов Владислав Андреевич: e-mail:v.a.popov1937@gmail.com; +380662989489, +380-66-456-31-42