



ПЯТЬДЕСЯТ ЛЕТ МОСТУ им. Е. О. ПАТОНА

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН**

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

академик Академии стр-ва Украины **О. И. ШУМИЦКИЙ**, гл. инж. проекта (ОАО «УкрНИИПСК» им. В. Н. Шимановского)

Рассмотрены решенные под руководством Е. О. Патона проблемы сварного мостостроения на начальном этапе его становления, завершившегося 50 лет назад сооружением уникального цельносварного моста через р. Днепр в Киеве. На базе заложенных при проектировании моста им. Е. О. Патона основополагающих принципов конструирования и установленных главных причин раннего зарождения усталостных трещин в элементах типовых пролетных строений показаны пути обеспечения нормативного срока службы цельносварных мостов. Определяющими признаны конструктивные решения пролетного строения и сварных узлов, исключающие возникновение в них дополнительных напряжений и вибраций. Важную роль в предотвращении разрушений играет выбор стали, технологии сварки и обработки сварных соединений.

Ключевые слова: пролетное строение, сварное соединение, напряжение, вибрация, усталостная трещина, сталь, срок службы

50 лет надежно служит людям цельносварной мост им. Е. О. Патона через р. Днепр в Киеве (рис. 1). В этом величественном уникальном сооружении воплощена давняя мечта его творца о «встрече электросварки с мостостроением». С окончанием строительства (открытие движения по мосту состоялось 5 ноября 1953 г.) завершился начальный и наиболее ответственный этап становления сварного мостостроения. Вскоре (18 декабря 1953 г.) мосту было присвоено имя Евгения Оскаровича Патона, а в 1995 г. он получил признание Американского общества сварщиков как выдающаяся сварная кон-

струкция с вручением ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины Памятного знака AWS (рис. 2).

Известно, что до сооружения моста им. Е. О. Патона как в СССР, так и в других странах многие попытки создания сварных мостов оканчивались неудачей. В них возникали трещины не только во время заводской и монтажной сварки, но и в процессе эксплуатации. Количество разрушений сварных пролетных строений возрастало. Из-за этого к сварным мостам во многих странах относились с большим недоверием. Проблема приобретала широкие масштабы, она становилась общей для всех металлических конструкций. Но все же это были только попытки и пробы, проверки или риск в расчете на удачу. Простая замена зак-



Рис. 1. Общий вид цельносварного моста им. Е. О. Патона через р. Днепр в Киеве

лепочных соединений сварными швами (да еще при тогдашней технологии сварки и применяемых материалах) не могла гарантировать надежную работу конструкции, особенно мостов, работающих в условиях низких климатических температур и сложного переменного нагружения. Требовался полный пересмотр всех подходов и положений относительно проектирования, изготовления и монтажа металлических пролетных строений (а по сути, и сварных конструкций в целом), более экономичных по сравнению с клепаными, но далеко не всегда еще отвечающих требованиям прочности, долговечности и технологичности.

Это обстоятельство активно использовали оппоненты в качестве основного аргумента против реализации идеи сварного моста в Киеве. Только благодаря высокому авторитету Евгения Оскаровича Патона и его инженерной смелости удалось добиться положительного решения директивных органов.

В 1946–1951 гг. Евгений Оскарович — признанный лидер в области сварки и мостостроения — объединил и организовал совместную работу проектировщиков моста и сотрудников Института электросварки. Они провели большой комплекс исследований и проектно-конструкторских разработок с целью развития изложенных Е. О. Патоном еще в 1933 г. основных принципов проектирования сварных мостов [1]. В результате этой большой работы было сделано следующее:

- создана новая конструктивная форма моста. Вместо спроектированных до войны решетчатых главных ферм большой высоты разработаны двутавровые сплошнотенчатые неразрезные балки с поясами из толстолистового металла и экономичной тонкой стенкой. Их высота была в пределах железнодорожного габарита для возможности изготовления и перевозки крупными блоками. Для обеспечения местной устойчивости стенки применена система горизонтальных ребер жесткости, включенных в состав сечений главных балок, технологичных при изготовлении и сварке. Это позволило достичь рекордной тонкостенности главных балок 1/250 с минимальным расходом стали, которая сосредоточена в поясах. Последние экономно усилены вторыми листами в зоне опор и в середине пролетов в соответствии с распределением изгибающих моментов. Над опорами моста главные балки усилены снизу блоками в виде вут;

- создана специальная марка низкоуглеродистой стали «МСтЗ для сварных мостов», малочувствительной к термомеханическому циклу сварки. Достигли этого путем регулирования химического состава ($\leq 0,20\% \text{ C}$, $0,12...0,25\% \text{ Si}$, $0,36...0,60\% \text{ Mn}$, $\leq 0,05\% \text{ S}$, $\leq 0,045\% \text{ P}$). В качестве раскислителей использовали кремний и алюминий, а установленный термический режим прокатки обеспечивал мелкозернистую структуру. Из этой стали изготовлен ряд опытных сварных пролетных строений железнодорожных мостов;

- разработаны и опробованы в промышленных условиях улучшенные марки электродных прово-



Рис. 2. Памятный знак Американского общества сварщиков, врученный ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в 1995 г.

лок (марганцовистая марки А, Св-ІГА) и флюсов (АН-348, АН-348А, ОСЦ-45);

- усовершенствована и упрощена аппаратура для автоматической и механизированной сварки конструкций на заводе, обеспечивающая стабильность заданного режима сварки в производственных условиях и точность направления электрода по шву (сварочный трактор ТС-17-М, полуавтомат ПШ-5, держатель ДШ-27);

- разработаны применительно к монтажу пролетных строений новые способы и аппаратура для автоматической сварки вертикальных стыковых швов с их принудительным формированием;

- разработана технология заводской и монтажной сварки;

- определены конструктивные решения сварных узлов пролетного строения и порядок их сварки, критерием чего служило обеспечение заданного уровня прочности и пластичности сварных соединений. Определяли эти показатели по результатам испытаний крупномасштабных образцов реальных бездефектных сварных соединений при минимальной температуре эксплуатации (в данном случае $-40\text{ }^\circ\text{C}$) с записью диаграммы растяжения. Принимали, что удовлетворительная работа сварного соединения в условиях эксплуатации будет гарантирована, если разрушающие напряжения σ_p достигают уровня временного сопротивления σ_b ($\sigma_p = \sigma_b$), который не ниже, чем у основного материала. Другим важным требованием было развитие предшествующей разрушению образца значительной пластической деформации ($\sigma_b \gg \sigma_T$).

Оценивали склонность металла к деформационному старению и переходу в хрупкое состояние на оригинальных крупномасштабных образцах с естественным концентратором напряжений в зоне сварки (узкая щель в продольном составном ребре жесткости, привариваемом угловыми швами к пластине).

Эти и другие разработки послужили научной основой проектирования, изготовления и строительства первого крупного в Европе цельносварного моста [2, 3]. Заводское изготовление металлоконструкций моста общей массой около 10 тыс. т осуществляли с декабря 1951 г. по апрель 1953 г., а монтажные работы — с апреля 1952 г. по октябрь 1953 г. Общая длина моста составляет 1543 м. Он имеет

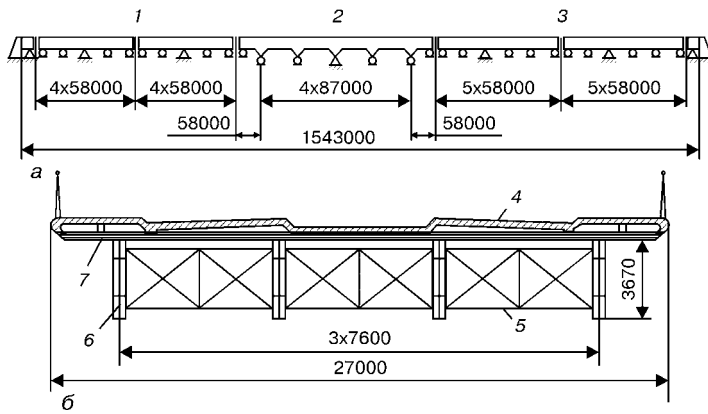


Рис. 3. Общая схема (а) и поперечное сечение (б) моста им. Е. О. Патона через р. Днепр в Киеве: 1 — левобережный участок (две неразрезные четырехпролетные балки жесткости); 2 — средний участок (то же, одна шести-пролетная); 3 — правобережный участок (то же, две шести-пролетные); 4 — железобетонная плита проезжей части; 5 — поперечные связи между главными балками; 6 — главная сварная двутавровая балка со сплошной стенкой; 7 — поперечная прокатная двутавровая балка

24 пролета — 20 по 58 м, а четыре судоходных — по 87 м (рис. 3, а). В поперечном сечении пролетное строение имеет четыре двутавровые главные балки со сплошной стенкой, расположенные друг от друга на расстоянии 7,6 м (рис. 3, б). Они объединены между собой поперечными связями. Продольные связи имеются только по нижнему поясу между средними главными балками по всей длине моста. Над опорами продольные связи устанавливались между всеми четырьмя главными балками. Верхние пояса объединены поперечными прокатными балками с включенной в их работу на изгиб железобетонной плитой проезжей части. Общая ширина моста 27 м (проезжая часть 21 м, два тротуара по 3 м). Посередине проезжей части проходят две трамвайные линии.

В связи с имевшимися ранее разрушениями сварных пролетных строений, кроме применения таких конструктивных решений сварных узлов, которые в наибольшей степени отвечали отмеченным выше требованиям прочности, огромное значение придавали качеству сварных швов. Поэтому

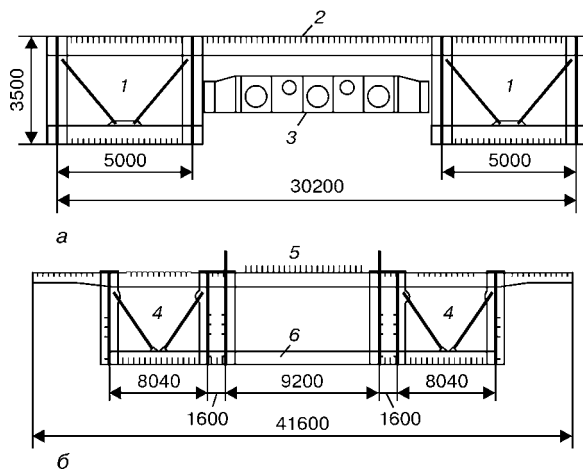


Рис. 4. Поперечное сечение металлических вантовых пролетных строений Московского (а) и Южного (б) мостов через р. Днепр в Киеве: 1 — корчатые главные балки; 2 — ортотропная плита проезжей части; 3 — диафрагмы; 4 — трехстенчатые корчатые главные балки с консолями; 5 — ортотропная плита специальной конструкции для проезда поездов метро; 6 — связи-распорки

в основу проектирования положен принцип максимального использования на заводе и монтаже автоматической и механизированной сварки под флюсом. С этой целью главные балки запроектированы в виде двутавра со сплошной стенкой, имеющей прямолинейные швы большой протяженности. Вертикальные ребра в основном были заменены горизонтальными. На заводе изготовление монтажных элементов главных балок осуществляли крупными блоками. Их длина составляла 27... 29 м, а масса — около 38 т. Кроме того, разработана специальная конструкция монтажного стыка со вставками вертикальной стенки, что дало возможность заварить автоматом стыки нижнего пояса с выводом шва на планки, их обрезкой и зачисткой заподлицо с листом нижнего пояса. Стыки вставки вертикальной стенки запроектированы для автоматической сварки способом принудительного формирования. Сварка стыков со вставками верхнего пояса также предусмотрена автоматами с выводом швов на планки, последующей их обрезкой и зачисткой заподлицо с поясом. Все это позволило выполнять 93 % всех заводских и 88 % монтажных швов главных балок автоматической и механизированной сваркой под флюсом, что гарантировало их высокое качество.

На протяжении пятидесяти лет мост им. Е. О. Патона интенсивно эксплуатируется без капитального ремонта. При этом важно подчеркнуть, что в последние десятилетия существенно возросли нагрузки на мост (до класса Н-30) и интенсивность движения (71 тыс. автомобилей в сутки) по сравнению с проектными значениями (класс Н-10, 10 тыс. автомобилей в сутки). При систематических осмотрах его сварных соединений и узлов трещины, надрывы и разрушения элементов не были обнаружены.

В то же время, как показывает опыт, в современных сварных пролетных строениях автомобильных и железнодорожных мостов, расчетный срок службы которых составляет 80... 100 лет, усталостные трещины зарождаются после незначительного срока эксплуатации [4, 5]. Как установлено в ходе исследований напряженно-деформированного состояния элементов пролетных строений, склонных к раннему зарождению усталостных трещин, основными причинами их возникновения являются местные дополнительные переменные напряжения и вибрация элементов пролетного строения, обусловленные главным образом несовершенством конструкции и оформления сварных узлов [6]. Поэтому конструктивный путь предупреждения усталостных разрушений пролетных строений мостов является одним из главных. При этом в нормах проектирования должны быть такие правила конструирования и оформления сварных узлов, применение которых позволило бы исключить появление недопустимых уровней вибраций и местных переменных напряжений, обеспечив, таким образом, заданную долговечность.

В этом отношении конструктивные решения балки жесткости моста им. Е. О. Патона являются



основополагающими и используются в современных подходах к проектированию сварных пролетных строений, не склонных к образованию усталостных трещин. Принципиальной конструктивной особенностью в данном случае является включение в совместную работу верхних поясов главных балок и поперечных балок, а также железобетонной плиты проезжей части.

Данный принцип получил существенное развитие в современных автодорожных мостах. Сплошностенчатые главные балки объединяются конструктивно и технологически с проезжей частью [7]. Наиболее перспективным здесь оказалось использование коробчатых пролетных строений. В этом случае система отдельных главных двутавровых балок со сплошной стенкой, объединяемых поперечными и продольными уголковыми связями, заменяется одной или несколькими (до трех) коробчатыми балками. Поперечные сечения двух киевских вантовых мостов через р. Днепр (Московского для автомобилей и Южного для автомобилей и поездов метро), которые вошли в сборник «Видатні мости світу», показаны на рис. 4 [8, 9]. В таких коробчатых пролетных строениях одним из основных элементов наряду с главными двутавровыми балками является стальная ортотропная плита. Современная конструкция ортотропной плиты представляет собой стальной лист, подкрепленный продольными ребрами жесткости и поперечными балками. Она используется в качестве проезжей части и одновременно служит расширенным верхним поясом главных балок. Подобной ортотропной плитой объединяются и нижние части главных балок (расширенный нижний пояс), образуя таким образом коробчатую балку жесткости.

В данных относительно жестких конструкциях напряжения в основных элементах распределяются более равномерно. Кроме того, отсутствуют главные причины возникновения значительных дополнительных напряжений и вибраций, приводящих к зарождению усталостных трещин. Детальное обследование металлической балки жесткости вантового пролетного строения Московского моста в 1999 г. (после 23 лет эксплуатации) и Южного в 2002 г. (после 12 лет эксплуатации) подтвердило, что в их элементах усталостные трещины не образовались.

Что касается пролетных строений железнодорожных мостов длиной 18,6...33,6 м, изготавливаемых и до настоящего времени по типовым проектам 1960–1970-х гг., то усталостные трещины возникают в них после 1–7 лет эксплуатации. Они поражают элементы, в которых их появление не ожидалось, расчету на усталость они не подлежат. Из наиболее распространенных следует отметить трещины в фасонках и элементах связей, сварных соединениях вертикальных ребер жесткости с поясами и горизонтальными ребрами, стенках главных балок в местах обрыва вертикальных ребер жесткости, зоне сплавления верхнего поясного шва в створе вертикальных ребер жесткости.

Одной из главных причин образования усталостных трещин являются дополнительные местные на-

пряжения и вибрация элементов пролетного строения из-за нецентрированной передачи обрабатываемой нагрузки от подвижного состава на главные балки. Принято, что расстояние между средними плоскостями стенок главных балок равно 2000 мм, а ширина железнодорожного пути — 1530 мм. При проектировании под руководством Е. О. Патоны в 1950-х гг. делалось все возможное для того, чтобы снизить влияние эксцентricности приложения нагрузки. В этих цельносварных пролетных строениях внешние листы верхних поясов, на которых закрепляются мостовые брусья, имели ширину 200 мм, связи размещались в уровне поясов, а вертикальные ребра жесткости приваривались к поясам с полным проваром. Долговечность таких пролетных строений в 15...20 раз выше по сравнению с типовыми 1960–1970-х гг. Такое существенное снижение долговечности пролетных строений 1960–1970-х гг. произошло в результате незначительных, на первый взгляд, изменений в проекте. Они заключались в увеличении ширины верхних поясных листов до 420 мм, в некоторых случаях в зависимости от длины пролета (18,2...33,6 м) — до 520 мм и даже до 620 мм, перенесении прикрепления связей с поясов на стенку балки и сопряжении вертикальных ребер жесткости с верхними поясами через сухарики. При наличии зазора в соединении вертикальных ребер жесткости и поясов (на практике он достигает 0,5...1,0 мм) проезд каждой тележки (даже оси) подвижного состава вызывает поворот пояса и выгиб стенки с ее плоскости в зоне выреза вертикальных ребер жесткости, а на участке между ребрами жесткости — изгиб стенки отсека по всей ее высоте. Последнее порождает поворот нижнего пояса и способствует возникновению колебаний отсека стенки. Значительно вибрируют и прикрепленные к стенкам связи. При определенных скоростях подвижного состава такие колебания могут быть резонансными. В случае увеличения ширины верхних поясов (420...620 мм) существенно возрастает односторонность опирания на них мостовых брусьев и соответственно эксцентricность передачи нагружения от рельсового пути на главные балки. При этом в поясах возникают дополнительные переменные напряжения от скручивания, а в связях и верхних участках стенки — от изгиба.

По уровню дополнительные напряжения незначительны и сами по себе не могут вызвать появление усталостных трещин. Однако они накладываются на основные поезда и, кроме того, к ним добавляются напряжения, возникающие в результате колебания системы пролетное строение–поезд, а также вибрации элементов пролетного строения. В этом случае долговечность элементов пролетного строения определяется амплитудными и частотными соотношениями складываемых напряжений [6]. Негативное влияние вибрации увеличивается с повышением относительных значений ее амплитуды и частоты.

Кроме того, здесь важно подчеркнуть, что пролетные строения 1960–1970-х гг. (типовые проекты) стали болтосварными. Первые болты появились в них в 1960-х гг. С их помощью при-



репляли продольные и поперечные связи к фасонкам. Затем болтами стали прикреплять и фасонки связей. В последнее время прикрепление вертикальных ребер жесткости к стенкам главных балок также осуществляют высокопрочными болтами. Сварными остались только стыки листов главных балок и поясные швы.

Между тем, опыт эксплуатации показал, что замена сварных швов соединениями на высокопрочных болтах не гарантирует исключения усталостных разрушений, поскольку остается главный источник их возникновения — нецентрированная передача нагружения на главные балки и другие причины, порождающие дополнительные местные переменные напряжения и вибрацию. При этом значительно выросла трудоемкость изготовления и монтажа болтосварных пролетных строений по сравнению с цельносварными, которые полностью сваривали на заводе и в готовом виде перевозили железной дорогой к месту установки.

Таким образом, применяемые конструктивные решения должны быть направлены в первую очередь на уменьшение эксцентricности передачи нагружения от подвижного состава на главные балки. Это может быть достигнуто, например, с помощью специальных центраторов, привариваемых к верхним поясам главных балок, которые соприкасаются с мостовыми брусьями по небольшой площади. Ее центральная ось должна совпадать со средней плоскостью стенки главной балки. Известны, например, случаи прикрепления рельсов непосредственно к верхним поясам главных балок без брусьев. В этом случае расстояние между главными балками уменьшается до ширины железнодорожного пути. Достаточно эффективным способом является устройство мостового полотна на балласте [10]. Балластное корыто, изготовляемое из железобетона, включается в работу верхних поясов главных балок.

Для удлинения срока службы эксплуатируемых сплошнотенчатых пролетных строений предлагается ряд новых способов их усиления, снижающих уровень вибрации элементов [11]. Они основаны на применении ортотропной плиты (с ездой на балласте, поперечинах) или усилении верхних поясов главных балок продольными ребрами.

Рассмотренные методы усовершенствования типовых проектов и реконструкции эксплуатируемых строений позволяют увеличить их долговечность. Однако, чтобы гарантировать нормативный срок эксплуатации 80–100 лет не трудоемких в изготовлении сварных пролетных строений железнодорожных мостов, необходимы принципиально новые конструктивные решения, исключающие основные причины раннего зарождения усталостных трещин.

С этой целью в условиях эксплуатации (на полигоне) проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов и сварных узлов пролетных строений, изготовленных по типовым проектам и с предложенными новыми конструктивными решениями. При их выборе определяющим был заложенный еще в 1950-е гг. Е. О. Патонам главный принцип

о совместной работе основных элементов пролетного строения.

На базе этих данных сформулированы исходные положения создания цельносварных пролетных строений железнодорожных мостов нового типа, не склонных к образованию усталостных трещин [6, 12, 13], основным из которых является объединение главных балок на уровне верхних поясов системой таких связей, которые улучшили бы пространственную работу пролетного строения за счет более равномерного распределения усилий между элементами и снижения в них уровня вибрации.

Для этого предложена замена продольных и поперечных связей уголкового профиля соответственно листами-вставками и листовыми диафрагмами закрытого или открытого типа. Важное значение при этом имеет способ приварки рассматриваемых элементов, состоящий в том, что листы-вставки, диафрагмы и ребра жесткости привариваются к верхним поясам главных балок с полным проваром. Вертикальные ребра жесткости и диафрагмы привариваются к верхней части стенок главных балок на расстоянии 200 мм от поясов также с полным проваром, в других местах — угловыми швами.

Предложенные листы-вставки и диафрагмы, образуя совместно со стенками главных балок жесткие клетки, исключают взаимные перемещения главных балок, повышают жесткость пролетного строения на изгиб (в горизонтальном и вертикальном направлениях) и кручение, способствуют равномерному распределению эксплуатационных напряжений. Это существенно снижает местное кручение верхнего пояса и связанные с ним дополнительные переменные напряжения в элементах пролетного строения, что приводит к снижению вибрации элементов.

Натурные испытания предложенного пролетного строения на экспериментальном кольце, по времени соответствующие примерно 60 годам эксплуатации на ветке железной дороги, показали его высокую сопротивляемость усталостным разрушениям. В его сварных узлах усталостные трещины не образовались. Предложенная конструкция пролетного строения может служить надежной основой для создания типовых проектов цельносварных сплошнотенчатых пролетных строений нового типа, стойких против усталостных повреждений.

ОАО «УкрНИИПСК» им. В. Н. Шимановского и ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан проект опытного цельносварного пролетного строения железнодорожного моста (расчетная длина 23,6 м), который планируется в этом году установить на одной из веток железных дорог Украины.

Наряду с усовершенствованием конструкции пролетных строений мостов необходимо проводить обработку сварных соединений с целью повышения их циклической долговечности. Здесь важно подчеркнуть, что конструктивные меры являются первоочередными, поскольку обработка сварных соединений при неблагоприятных условиях (наличие дополнительных напряжений и вибраций)



не всегда может привести к желаемым результатам. Из большого количества способов повышения сопротивления усталости сварных соединений (механический, ТИГ-переплав, поверхностное пластическое деформирование — ППД) наиболее перспективными следует признать способы обработки, положительное влияние которых основывается на снижении коэффициента концентрации напряжений в зоне перехода от основного материала к металлу шва, где чаще всего и зарождаются усталостные трещины, и создании там благоприятных остаточных напряжений сжатия [6, 14, 15]. Такой способ ППД, как ультразвуковая ударная обработка (УУО) с магнитострикционным преобразователем электрических колебаний в механические, разработан в 1980-х гг. [16, 17]. В последнее время ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины перешел на компактное оборудование для ППД — высокочастотную механическую проковку (ВМП) с преобразователем на основе обратного пьезоэлектрического эффекта [18, 19]. В первом случае выходная мощность ультразвукового генератора, инициирующего колебания, составляет 1 кВт и более, а во втором — достигает 0,4 кВт.

Известна общая тенденция повышения эффективности высокочастотной механической проковки с возрастанием прочности стали при условии использования одного и того же режима ВМП. Данные об эффективности ВМП основных типов сварных соединений конструкционных сталей относительно низкой прочности, в том числе и материалов, рекомендованных для мостостроения (15ХСНД, 09Г2СЮч), приведены в таблице. Они показывают возможность получения значительного повышения предела выносливости (до 100 %) и для указанных сталей. Важным при этом является установление оптимального режима ВМП в зависимости от класса прочности стали и типа сварного соединения.

Таким образом, полученные данные об эффективности ВМП, ее высокая производительность и относительно низкая потребляемая мощность оборудования позволяют считать ВМП наиболее перспективным способом повышения сопротивления усталости сварных соединений. ВМП проста в реализации, ее стоимость ниже по сравнению с другими способами обработки (механическим, ТИГ-переплавом, дробеструйной).

Влияние высокочастотной механической проковки на свойства сталей различной прочности

Исследуемые материалы и соединения				Условия нагружения	
Марка стали	Временное сопротивление, МПа	Толщина, мм	Тип соединения	Вид нагружения	Коэффициент асимметрии
СтЗсп	458	20	Стыковое	Растяжение	0
E460	589	10	Тавровое	Изгиб	0,1
WELDOX 420	573	20	Поперечное ребро, приваренное угловыми швами		0,1
	573	20			0,1
TMCP	560	20			0,1
СтЗсп	460	30		Растяжение	0
	460	30	0		
	460	30	0		
09Г2СЮч	550	14	Продольное ребро	0	
15ХСНД	520	14		0	
G235B	436	8	Стыковое	Изгиб четырехточечный	0,1
	436	8	Крестообразное		0,25
	436	8			-0,5

Продолжение таблицы

Марка стали	Предел выносливости при $N = 2 \cdot 10^6$ цикл, МПа,		Повышение предела выносливости,		Примечание
	в исходном состоянии	после обработки	МПа	%	
СтЗсп	140	220	80	57	[17]
E460	168	290	122	73	[20]
WELDOX 420	198	327	129	65	[21] (различные технологии обработки)
	198	341	143	72	
TMCP	178	351	173	97	[22]
СтЗсп	113	167	54	49	Данные ИЭС (различные технологии обработки)*
	113	164	51	48	
	113	226	113	100	
09Г2СЮч	96	156	60	62	Данные ИЭС
15ХСНД	86	180	94	110	
G235B	148	234	86	57	[23]*
	142	234	92	64	
	165	282	117	71	

* Инструмент с пьезокерамическим преобразователем.

Кроме рассмотренных конструктивных и технологических путей обеспечения долговечности пролетных строений мостов, существенное значение имеет выбор стали для их изготовления. Уровень служебных свойств конструкционных материалов для мостов должен быть достаточным для исключения хрупких, вязких и слоистых (ламельных) разрушений. В настоящее время в мостостроении применяются стали весьма ограниченного перечня с максимальным нормативным сопротивлением (пределом текучести) — до 390 МПа [24, 25]. Несомненно, этот перечень сталей следует расширять в части повышения прочности и других служебных свойств металлопроката.

Новые составы и технологии изготовления конструкционных материалов открыли для этого ши-

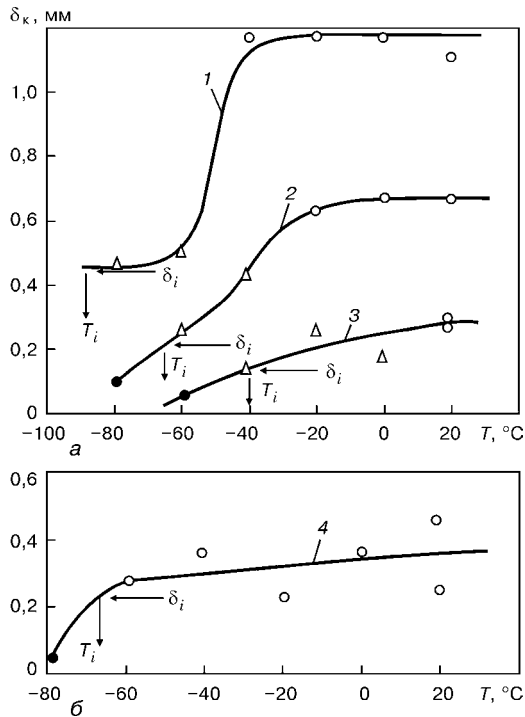


Рис. 5. Температурная зависимость вязкости разрушения δ_k (δ_c , δ_i , δ_u , δ_m) стали 09Г2СЮч в исходном состоянии (1) и после деформационного старения (2), металла шва (3) и зоны термического влияния (4); ● — δ_i ; Δ — δ_u ; ○ — δ_m

рокие возможности. В то же время необходимо иметь в виду, что экономнолегированные стали повышенной и высокой прочности более чувствительны к технологическому переделу. Это требует проведения на стадии их освоения всесторонних исследований основного материала и металла сварных соединений с использованием современных методов, включая критерии механики разрушения [26].

В зарубежной практике есть примеры использования материалов с пределом текучести 600...800 МПа [27, 28]. В последнее время для изготовления автомобильных, городских и пешеходных мостов применяется отечественная сталь 09Г2СЮч ($\sigma_{0,2} \geq$

≥ 450 МПа) [24], разработанная на базе широко используемой стали 09Г2С. Удачное сочетание повышенного содержания марганца, микролегирования (алюминий, церий) и внепечных обработок обеспечивает высокие стабильные служебные свойства. Так, при гарантированном значении предела текучести 450 МПа и временного сопротивления 580 МПа ударная вязкость стали 09Г2СЮч на образцах с острым надрезом KCV при температуре -70°C равна 55...69 Дж/см².

Обоснование требований к сталям для мостостроения и их сварным соединениям, призванных исключить хрупкие, вязкие и слоистые разрушения, следует основывать на современных подходах и критериях механики разрушения с использованием концепции «соответствие назначению». Для контроля за выполнением этих требований в заводских условиях при изготовлении материалов и металлоконструкций определяют показатели KCV, необходимые уровни которых устанавливаются в соответствии с корреляционными зависимостями KCV- δ_{1c} (δ_{1c} — критическое раскрытие вершины трещины) [29].

На примере стали 09Г2СЮч рассмотрены принципиальные положения установления требований к основному материалу и металлу сварных соединений, направленных на исключение хрупких и вязких разрушений. Оценку вязкости разрушения стали 09Г2СЮч (толщина листа 12 мм) и ее сварного стыкового соединения (заводская механизированная сварка в углекислом газе, проволока Св-08Г2С) осуществляли при различных температурах на основе деформационного критерия механики разрушения δ_k (рис. 5). В зависимости от характера и стадии разрушения приняты следующие обозначения: δ_c — зарождение хрупкого или квазихрупкого разрушения ($T < T_i$, T_i — температура перехода от квазихрупкого к вязкому разрушению); δ_u — то же, после инициирования и стабильного подрастания вязкой трещины ($T \geq T_i$); δ_i — зарождение вязкого разрушения ($T \geq T_i$); δ_m — переход стабильно развивающейся вязкой трещины в неустойчивое состояние ($T > T_i$).

Величину δ_i определяли с помощью δ_R -кривых (рис. 6). Исследования показали, что δ_i не зависит от температуры и скорости нагружения [30, 31]. Кроме того, при выполнении условия плоской деформации

$$t > \delta_i E / \lambda \sigma_T$$

(E — модуль упругости; λ — коэффициент, равный 4...5) величина δ_i становится независимой от толщины металла t . Иными словами, ее можно рассматривать в качестве характеристики материала и использовать для оценки «соответствия назначению» элементов сварных конструкций.

Для предупреждения наиболее опасных хрупких разрушений температура перехода от квазихрупкого к вязкому инициированию трещины T_i основного материала и металла сварных соединений должна быть ниже минималь-

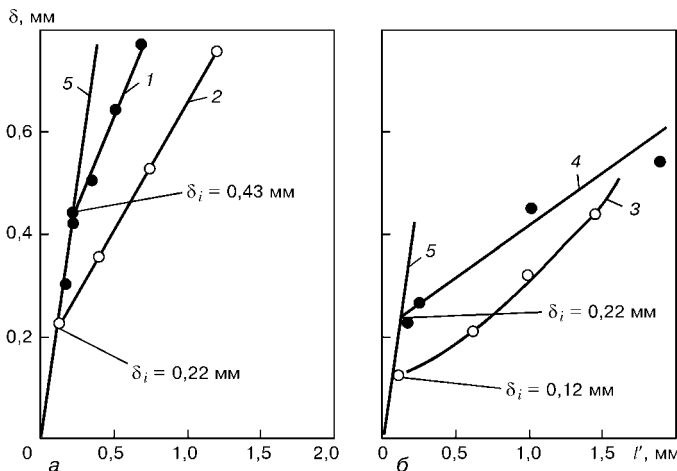


Рис. 6. Зависимость раскрытия вершины трещины δ от стабильного приращения ее длины l' в вязком состоянии (δ_R -кривые) для стали 09Г2СЮч: 1 — исходное состояние; 2 — после деформационного старения; 3 — металл шва; 4 — зона термического влияния; 5 — линия затупления вершины трещины ($\delta = 2l'$); точки — экспериментальные данные

ной температуры эксплуатации $T_э$ ($T_i < T_э$). При этом важно, чтобы в лабораторных испытаниях по определению T_i воспроизводили условия работы металла в реальной конструкции. Принципиальное значение в данном случае имеет скорость нагружения и степень объемности напряженно-деформированного состояния, которая главным образом определяется толщиной образца и размером исходного трещинообразного дефекта. С учетом этого приемлемые для большинства практических случаев значения T_i могут быть получены при испытании стандартных образцов полной толщины со скоростью деформирования металла в вершине дефекта, отвечающего условиям эксплуатации. Такие данные в зависимости от скорости раскрытия вершины трещины δ' для некоторых конструкционных материалов и сварных соединений представлены на рис. 7.

Условие работы металла в вязком состоянии ($T_i < T_э$) следует рассматривать как определяющее. Обусловливается это принципиальным изменением в характере развития трещины. Ниже T_i она нестабильна с момента инициирования, а в температурном интервале выше T_i разрушению предшествует стадия стабильного развития трещины после ее зарождения.

Кроме неравенства $T_i < T_э$, вполне очевидна необходимость введения еще одного дополнительного условия, которое относится к уровню вязкости разрушения δ_i на стадии зарождения вязкой трещины с целью ограничения ее размера заданным значением. Оно записывается $\delta_i > \delta_i^*$, где δ_i^* — необходимый (минимальный) уровень вязкости разрушения, призванный гарантировать неразрушимость конструкции при наличии в ней предполагаемого (гипотетического) трещинообразного дефекта. Значение δ_i^* устанавливается исходя из концепции «соответствие назначению».

Таким образом, выбор стали и технологии сварки в соответствии с условиями

$$T_i < T_э, \quad \delta_i > \delta_i^*$$

будет гарантировать надежную эксплуатацию металлоконструкции, исключая возникновение хрупких и вязких разрушений.

Кроме того, сталь для мостостроения должна иметь достаточный уровень сопротивления зарождению слоистых разрушений. Известно, что служебные свойства металлопроката, включая пластичность и вязкость, заметно снижаются при переходе от продольного к поперечному направлению и могут достигать весьма низких значений в направлении толщины (направление Z). В результате появляется угроза возникновения слоистых (ламельных) трещин под действием незначительных напряжений, направленных перпендикулярно плоскости листа. В дальнейшем такие трещины могут служить началом развития в элементах конструкции хрупких, вязких и усталостных разрушений под воздействием основных напряжений [32].

В настоящее время для оценки склонности сталей к слоистому разрушению наиболее широко

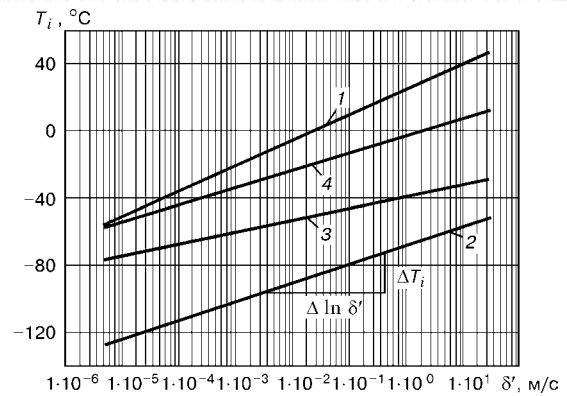


Рис. 7. Зависимость переходной температуры T_i от скорости раскрытия вершины трещины δ' в полулогарифмической системе координат: 1 — сталь 09Г2С; 2 — микролегированная (Mn-Ni-Mo-Nb) сталь контролируемой прокатки; 3 — то же (Mn-Ti); 4 — металл шва стали контролируемой прокатки (Mn-Ti)

используется показатель относительного сужения ψ_Z гладкого стандартного образца с осью, ориентированной в направлении Z . Что касается его уровня, то в соответствии с техническими условиями на толстолистовой прокат для мостостроения ψ_Z при комнатной температуре должно составлять более 20 %. Практика показала, что это значение ψ_Z является оптимальным с точки зрения предупреждения образования слоистых трещин в процессе технологических операций (сварка, наплавка и др.) при изготовлении металлоконструкций, когда температура равна комнатной и выше.

С понижением температуры характеристики пластичности и вязкости разрушения металла в направлении Z могут резко ухудшаться. Это связано не только с обычным температурным охрупчиванием металла, но и с его склонностью к «низкотемпературному» слоистому разрушению, обусловливаемому кристаллографической текстурой и ослаблением границ субзерен [33]. В значительной мере это касается современных сталей с незначительным содержанием неметаллических включений и достаточно высоким уровнем изотропности свойств при нормальных и повышенных температурах. Поэтому высокие значения ψ_Z при положительных температурах являются необходимым условием, но далеко не достаточным для предупреждения слоистых разрушений при эксплуатации сварных металлоконструкций.

В этой связи наряду с определением ψ_Z при комнатной температуре необходимо введение испытаний конструкционных сталей в направлении Z при минимальной расчетной температуре с использованием критериев механики разрушения. При этом оптимальные требования к вязкости разрушения должны устанавливаться на основе концепции «соответствие назначению». Эти требования могут приводиться непосредственно нормативными значениями характеристик механики разрушения или в соответствующих показателях стандартных ударных испытаний образцов с острым надрезом KCV .

В заключение необходимо подчеркнуть, что создание полвека назад первого крупного цельносварного моста с выполнением целого комплекса



исследовательских и проектно-конструкторских работ для обеспечения его надежной эксплуатации открыло дорогу электросварке в мостостроение и вышло далеко за рамки решения частной задачи отдельного объекта. Тогда был выработан ряд принципиальных подходов и конструктивно-технологических решений для широкого использования электросварки в металлостроительстве вообще.

В результате опыта совместной работы проектировщиков, ученых, исследователей и технологов создана школа сварных строительных конструкций Е. О. Патона, значительным результатом которой было создание ряда выдающихся сооружений, а также дальнейшее развитие науки в этой области.

1. Патон Е. О., Горбунов Б. Н. Принципы проектирования сварных мостов // Автоген. дело. — 1933. — № 4. — С. 2–5.
2. Статическая прочность сварных соединений из малоуглеродистой стали / В. В. Шеверницкий, В. И. Новиков, Г. В. Жемчужников, В. И. Труфяков; Под общ. ред. Е. О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — 88 с.
3. Применение автоматической сварки при строительстве большого городского цельносварного моста / Е. О. Патон, Д. П. Лебедь, Е. Н. Радзевич и др. — Киев: Изд-во АН УССР, 1954. — 57 с.
4. Усталостные трещины в сплошностенчатых пролетных строениях / Ю. П. Миролюбов, Е. М. Панин, В. В. Фролов и др. // Вопросы проектирования и эксплуатации искусственных сооружений: Сб. тр. НИИ мостов. — Л.: Ин-т инж. ж.-д. транспорта им. В. Н. Образцова, 1983. — С. 62–69.
5. Фишер Дж., Мерц Д. Трещинообразование в стальных мостах // Гражд. стр.-во. — 1985. — № 2. — С. 9–13.
6. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 11–19.
7. Сварные строительные конструкции: В 3 т. Т. 2. Типы конструкций / Под ред. Л. М. Лобанова. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. — 680 с.
8. Фукс Г. Б., Корнеев М. М. Вантовые мосты по украинским проектам. Настоящее и перспектива // Сучасні проблеми проектування будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення: Зб. доп. Другого засідання укр. міжгалуз. наук.-прак. сем. (30 черв. — 1 липн. 1998 р., м. Київ). — Киев: ОПВТД ОАО ПТИ «Киеворгстрой», 1998. — С. 208–217.
9. Юхані Вірла. Видатні мости світу / Під ред. проф. А. І. Лантух-Лещенко. — К.: НТУ, 2001. — 56 с.
10. Металлические конструкции. Спец. курс / Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий, Г. С. Ведеников и др.; Под ред. Е. И. Беленя. — М.: Стройиздат, 1991. — 687 с.
11. Орлов В. Г., Дорошкевич А. А., Зенкин А. И. Новые способы усиления сплошностенчатых пролетных строений // Путь и путевое хоз-во. — 1997. — № 8. — С. 9–10.
12. Trufiakov V. I., Dvoretzky V. I., Lobanov L. M. Fatigue failures of welded bridges in CIS: Results of inspection, investigation and experimental tests // Welded structures in particular welded bridges: Intern. conf. (Hungary, 2–3 Sept., 1996). — Budapest, 1996. — P. 321–327.
13. New approach to the creation of solid-walled welded span structures of railway bridges / V. I. Trufiakov, V. I. Dvoretzky, V. G. Orlov, A. A. Doroshkevich // Welded Structures. — 1995. — 8, № 1. — P. 249–255.
14. Кудрявцев И. В., Наумченков И. Е. Усталость сварных конструкций. — М.: Машиностроение, 1976. — 271 с.
15. Trufiakov V. I., Mikheev P., Kudryavtsev Yu. Fatigue strength of weld structures. Residual stresses and strengthening treatments // Welding and Surfacing Reviews. — 1995. — 3, № 2. — P. 100.
16. Статников Е. Ш., Шевцов Е. М., Куликов В. Ф. Ультразвуковой ударный инструмент для упрочнения сварных швов и уменьшения остаточных напряжений // Новые физические методы интенсификации технологических процессов. — М.: Металлургия, 1977. — С. 27–29.
17. Эффективность применения ультразвуковой обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений / П. П. Михеев, А. Я. Недосека, И. В. Пархоменко и др. // Автомат. сварка. — 1984. — № 3. — С. 4–7.
18. А. с. 601143 СССР, МПК В 24 В 39/04. Ультразвуковой многобойковый инструмент / Г. И. Прокопенко, В. П. Кривко. — Оpubл. 05.03.78; Бюл. № 13.
19. Применение высокочастотной механической проковки для повышения сопротивления усталости стыковых соединений алюминиевых сплавов / В. И. Труфяков, В. А. Шонин, В. С. Машин, Д. С. Романовский // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 7–11.
20. Improvement of fatigue strength in welded joints (in HSS and in aluminium alloy) by ultrasonic hammer peening / I. I. Yanosch, N. Koneczny, S. Debiez et al. — S. l., [1995]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1594–95).
21. Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods / E. Sh. Statnikov, V. O. Muktepaev, V. I. Trufiakov et al. — S. l., [2000]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1870–00).
22. The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints / V. I. Trufiakov, E. Sh. Statnikov, P. P. Mikheev, A. Z. Kuzmenko. — S. l., [1998]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1745–98).
23. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method / X. Lixing, W. Dongpo, Z. Yufeng, C. Yunmei. — S. l., [2000]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1812–00).
24. СНУП 2.05.03–84*. Мосты и трубы / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 200 с.
25. ГОСТ 6713–91. Прокат низколегированный конструкционный для мостостроения. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 11 с.
26. Кирьян В. И., Муходуй Л. И. Проблемы использования новых сталей повышенной и высокой прочности в сварных конструкциях // Автомат. сварка. — 2002. — № 3. — С. 10–17.
27. Fisher J. W., Dexter R. I. High-performance steel for american bridges // Welding J. — 1994. — № 1. — P. 35–43.
28. Recently developed structure steel for use in civil engineering and constructions / S. Tani, V. Kaneko, M. Ishiguro, M. Ohama // NKK Technical Review. — 1996. — № 74. — P. 17–25.
29. Гиренко В. С., Дядин В. П. Зависимость между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // Автомат. сварка. — 1986. — № 10. — С. 61–62.
30. Кирьян В. И. Методика оценки сопротивления конструкционных сталей вязким разрушениям // Там же. — 1984. — № 11. — С. 1–6.
31. Оценка вязкости разрушения конструкционных сталей в условиях высокоскоростного деформирования / В. И. Кирьян, А. П. Ващенко, Л. А. Волгин, С. В. Шамаповский // Пробл. прочности. — 1993. — № 5. — С. 51–59.
32. Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений / В. С. Гиренко, А. В. Бернадский, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова // Там же. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
33. Сварные строительные конструкции: В 3 т. Т. 1. Основы проектирования конструкций / Под ред. Л. М. Лобанова. — Киев: Наук. думка, 1993. — 416 с.

Problems of welded bridge construction, solved under supervision of E. O. Paton, are considered at initial stage of its establishment and, finally, 50 years ago by the construction of unique all-welded bridge across the Dnieper river in Kiev. The ways of assurance of a design service life of all-welded bridges are shown on the basis of basic principles of designing and established main causes of earlier initiation of fatigue cracks in elements of standardized spans, which were used in designing of E.O.Paton bridge. Design solutions of spans and welded connections, eliminating occurrence of secondary stresses and vibrations in them, were recognized determinant. Selection of steel, technology of welding and treatment of welded joints plays an important role in prevention of fractures.

Поступила в редакцию 19.03.2003