

ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ В СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ЯПОНИИ (ОБЗОР)

Ю. ФУДЖИТА (Япон. свароч. техн. о-во, г. Токио, Япония), **Ю. НАКАНИСИ** (Корпорация ИНИ, г. Токио, Япония),
Н. ЮРИОКА (Науч.-исслед. ин-т соединения и сварки, Ун-т г. Осака, Япония)

Рассмотрены сварочные технологии применительно к проектированию и изготовлению стальных конструкций для кораблей и мостов, а также описаны последние достижения в области автоматизации сварки и применение в промышленности Японии новых сварочных процессов — лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием.

Ключевые слова: сварная конструкция, судостроение, мост, лазерная сварка, сварка трением с перемешиванием

Сварочные технологии в судостроении. На рис. 1 показан первый в мире сверхкрупный танкер для перевозки сырой нефти «Idemitsu» построенный в 1966 г., а также новый танкер на судоверфи, построенный недавно с применением последних технических достижений. При строительстве «Idemitsu» впервые использовали новый процесс автоматической односторонней сварки для стали с временным сопротивлением 490 МПа. Современные танкеры для перевозки нефти представляют собой конструкции с двойным корпусом. Большие панели обшивки днища получают стыковой сваркой листов, свариваемых угловыми швами с продольными ребрами жесткости, затем эти сварные панели собирают сборочными элементами для получения блоков обшивки днища с двойным корпусом. Такая конструкция оказалась очень перспективной для указанных танкеров, поскольку исключает разлив нефти в случае, если судно сядет на мель. Это обусловило увеличение количества заказов на танкеры с двойным корпусом, успешно заменяющих танкеры с одним

корпусом. Однако у танкеров с двойным корпусом значительно увеличилась масса корпусного блока, а также количество соединений сложной формы, которые должны выполняться в доке. Таким образом, усложнение конструкций вызвало снижение эффективности производства.

Сварка в положении «в лодочку», самый простой способ автоматической дуговой сварки металлургическим покрытым электродом, была разработана в Японии во время второй мировой войны. Этот способ сварки позволяет одному оператору-сварщику одновременно управлять несколькими машинами для сварки «в лодочку», что значительно повышает эффективность производства. Хотя вместо этого способа сварки в настоящее время применяют другие автоматические процессы сварки, его все еще используют на некоторых судоверфях в основном для соединения сборочных узлов. В судостроении наиболее широко применяется сварка в углекислом газе, которую выполняют с помощью множества различных автоматов, установленных на каретки упрощенной конструкции.

Автоматическая сварка применяется для соединения блоков в параллельной части корпуса [1,

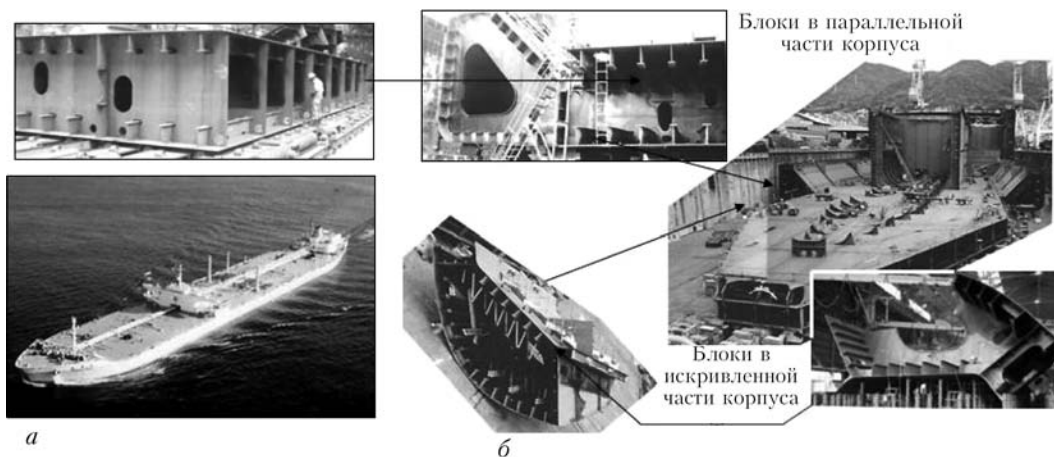


Рис. 1. Первый в мире сверхкрупный танкер для перевозки сырой нефти «Idemitsu», построенный в Японии в 1966 г. (а), и новый перспективный танкер с двойным корпусом (б)

2]. Машины для автоматической сварки угловых швов в углекислом газе, оснащенные несколькими горелками, часто используются для сварки листов обшивки корпуса и продольных ребер жесткости. На многих судостроительных заводах для скоростной стыковой сварки больших листов обшивки корпуса применяют одностороннюю многоточечную сварку под флюсом с медной подкладкой. Полуавтоматическую или роботизированную сварку используют для соединения поперечных и продольных элементов в сборочных процессах, широко применяют также и системы роботизированной сварки.

После установки блоков двойные листы наружной обшивки днища и листы бортовой обшивки соединяют сваркой блок с блоком [3]. При этом сваривают все секции блоков включая продольные ребра жесткости. Машины для полуавтоматической сварки в углекислом газе и для автоматической сварки устанавливают на автоматические тележки упрощенной конструкции, однако для соединения блоков часто используют сварку под флюсом на асбестовой флюсовой подушке. Стыковую сварку листов бортовой обшивки выполняют автоматической газоплазменной сваркой и автоматической сваркой в углекислом газе. Для осуществления стыковой сварки продольных ребер жесткости применяют упрощенные роботы портативного типа.

Изменились классы сталей, используемых в судостроении, — от низкоуглеродистых до высокопрочных, их предел текучести повысился с 320

до 360 и с 360 до 400 МПа. В 1980-х годах была разработана и теперь широко используется в судостроении сталь ТМСП, полученная с контролем термомеханических характеристик. Благодаря применению такой стали достигнуто значительное повышение эффективности производства в судостроении. Измельчение зерна способствует одновременному повышению показателей прочности и вязкости стали. Добавка легирующих элементов в меньшей степени влияет на уровень прочности стали, вызывая снижение углеродного эквивалента. Сталь ТМСП является сталью контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения [4, 5]. На рис. 2, а представлено влияние применения стали ТМСП на показатели высокоэффективной сварки с высоким тепловложением, а на рис. 2, б — предотвращение образования холодных трещин при сварке угловых швов без предварительного нагрева [6]. На рис. 2, а видна зависимость между тепловложением при сварке и ударной вязкостью по Шарпи на линии сплавления и в зоне термического влияния (ЗТВ) при сварке с высоким тепловложением стальных листов для корпусных конструкций. Значения тепловложения (или погонной энергии) в судостроении ограничено (10 кДж/мм) для обычной стали включая нормализованную. Однако применение стали ТМСП и стали, стойкой к высокому тепловложению, позволило внедрить процессы сварки, для которых характерно сверхвысокое тепловложение, такие, как односторонняя сварка под флюсом, газоплазменная сварка и электрошлаковая сварка.

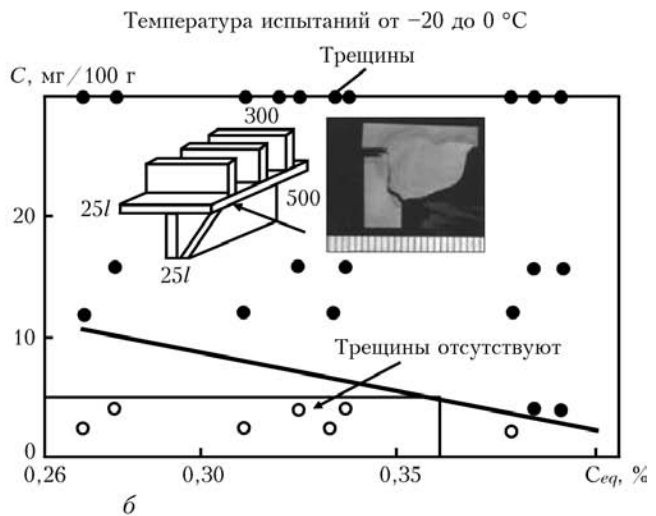
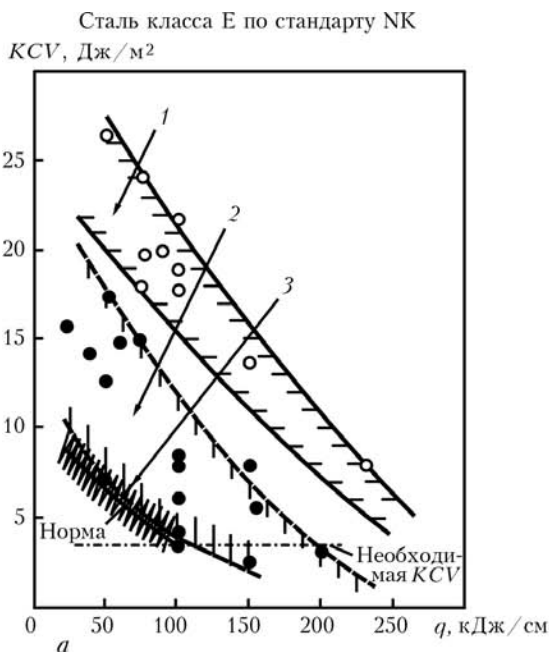


Рис. 2. Применение стали ТМСП при высокоэффективной сварке с высоким тепловложением (а) и предотвращение образования холодных трещин при сварке угловых швов без предварительного нагрева (б): 1, 2 — сталь ТМСП с обработкой соответственно для получения высокой и невысокой стойкости к тепловложению q; 3 — обычная (нормализованная) сталь; KCV — ударная вязкость по Шарпи на линии сплавления и в ЗТВ при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; C — концентрация диффузионно-подвижного водорода в металле шва по стандарту JIS (глицериновый метод); C_{eq} — углеродный эквивалент по стандарту МИС

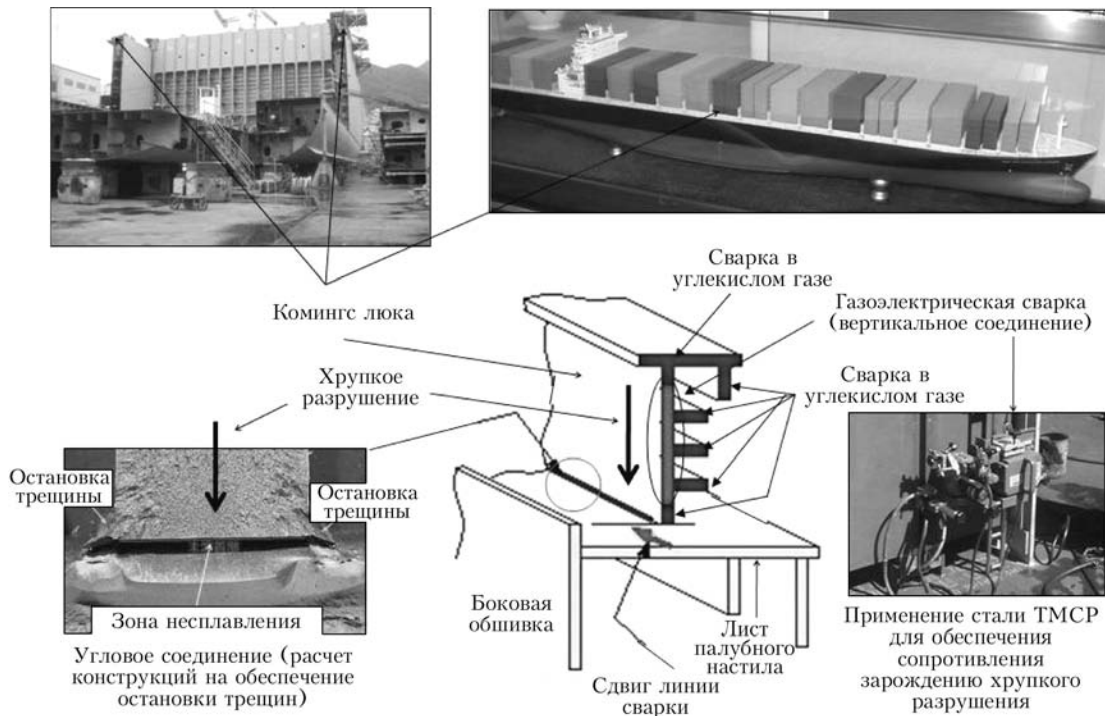


Рис. 3. Конструкция контейнеровоза и концепция обеспечения безопасности сварных соединений на комингсах люка с помощью расчета сопротивления хрупкому разрушению

На рис. 2, б показано влияние углеродного эквивалента стали C_{eq} и концентрации C диффузионно-подвижного водорода в металле шва при угловой сварке в потолочном положении. Для предотвращения образования холодных трещин при выполнении угловых швов в потолочном положении на обычной стали используется предварительный нагрев. В настоящее время при сварке без предварительного нагрева можно использовать сталь с углеродным эквивалентом не выше 0,36 % при условии применения безводородных электродов.

В 1997 г. на море произошла авария с контейнеровозом [7]. На рис. 3 представлены конструкции контейнеровоза, а также концепция обеспечения эксплуатационной стойкости сварных соединений, полученных на продольных комингсах люка, против хрупких разрушений. Согласно существующим требованиям, грузовые контейнеры должны размещаться в нижней части корабля, поэтому в контейнеровозах на палубах делают большие отверстия и продольные комингсы люка, расположенные вертикально вверх до палубы, крепятся с целью обеспечения длительной прочности контейнеровозов. В настоящее время строят очень большие контейнеровозы, в дальнейшем планируется внедрять контейнеровозы, способные перевозить более тысячи контейнеров. В этих кораблях толщина листов комингсов, выполненных из стали с пределом текучести 390 МПа, составляет 80 мм. С точки зрения производительности, для этого материала желательно использовать газоэлектрическую сварку с высоким тепловложе-

нием. Однако такой процесс сварки способствует снижению вязкости металла шва и ЗТВ. В этой связи актуальной проблемой является обеспечение стойкости против хрупкого разрушения. Именно сталь ТМСП, имеющая высокую ударную вязкость, характеризуется стойкостью к зарождению хрупкого разрушения. Однако согласно принципу двойной целостности она должна отличаться способностью к остановке трещины в случае их зарождения и распространения.

При сварке с полным проплавлением листов палубного настила из обычной стали и продольных комингсов люка трещины могут распространяться в шве и проходить через данные листы. Для исключения такой ситуации на одном из судостроительных заводов используют листы палубного настила из материала со сверхвысокой способностью к остановке трещин. В то же время на другом судостроительном заводе считают, что целесообразным является применение угловых швов вместо стыковых с полным проплавлением, поскольку в швах на продольных комингсах люка и листах палубного настила возникают только напряжения сдвига. Применение угловых швов обеспечивает остановку в них трещин, поэтому необязательно использовать сталь со сверхвысокой способностью к остановке трещин на листах палубного настила. Эта концепция называется «расчет конструкций на обеспечение остановки трещин». При использовании швов с частичным проплавлением и соответствующей формой разделки распространяющаяся в листе палубного

настила трещина в конце концов останавливается, даже если он выполнен из обычной стали.

Технологии сварки мостов. Мост Чолкинесс в США — первый мост, построенный в 1958 г. с помощью сварки из высокопрочной стали с временным сопротивлением на растяжение 780 МПа (марка НТ780). Такая сталь изначально была разработана для верхней палубы авианосца «York Town» [8]. Эту сталь импортировали в Японию, из нее был изготовлен сферический резервуар для хранения газа.

Сталь НТ780 начали применять для строительства мостов в 1970 г. Первым мостом, где ее применили, был мост Минато, построенный в 1974 г. Сталь НТ780 частично использовали также для моста Сето, сооруженного в 1988 г. Мост Акаси-кайкио, самый длинный подвесной мост в мире, начали строить в 1974 г. с применением стали НТ780, его строительство завершили в 1998 г.

Мост Акаси-кайкио выполнен из жестких решетчатых ферм толщиной 30 мм. В начале необходимая температура предварительного нагрева для стали НТ780 составляла 100 °С. Однако показатель C_{eq} и показатель химического состава P_{cm} , склонный к образованию трещин в шве японской стали НТ780, год от года снижались. В результате необходимая температура предварительного нагрева стали НТ780 с толщиной листа 30 мм была снижена до 50 °С. Это оказалось очень полезным, поскольку способствует снижению до минимума деформации свариваемых элементов, а

следовательно, сокращает время строительства мостов.

Мост Сето — единственный железнодорожный мост, построенный из стали НТ780. При его строительстве произвели расчет на усталостную прочность, основанный на результатах нескольких испытаний. Однако повышение усталостной прочности высокопрочных сталей, в частности стали НТ780, — это проблема, которую еще предстоит решить.

При строительстве мостов используются установки для угловой сварки несколькими горелками, а для автоматической угловой сварки — установленные на каретках упрощенной конструкции, подобные используемым в судостроении. В последнее время в строительстве мостов преобладает концепция рационального проектирования. На рис. 4 показаны конструкции мостов, созданные на основе концепции рационального проектирования, а также выполнение сварки в полевых условиях. В конструкции с плоскими фермами (рис. 4, а) количество основных ферм изменилось с двух полос на четыре основные фермы, в традиционной конструкции моста — до трех полос на три основные фермы. Мост, построенный на основе данной концепции, является мостом с минимальным количеством ферм. Ферма коробчатого сечения типа трех полос на две основные фермы (рис. 4, б) имеет длину пролета 100 м. Эта рационализация в проектировании мостов подкреплена хронологическим изменением (хронология — изучение размещения элементов в

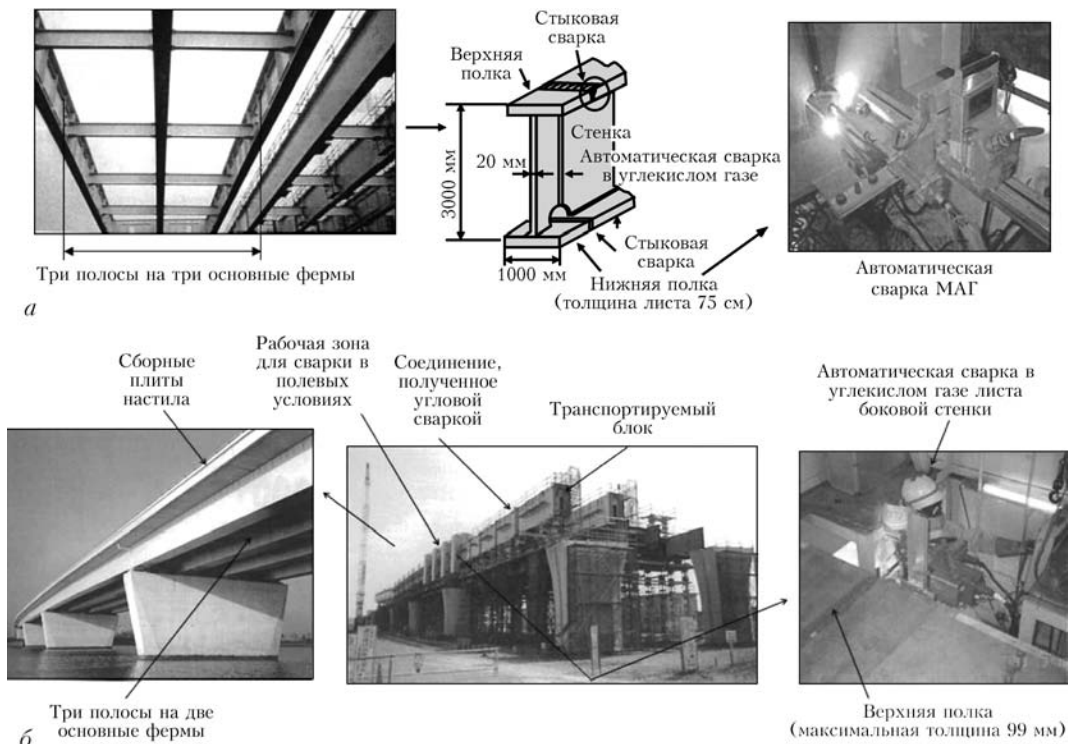


Рис. 4. Конструкция моста, созданная на основе концепции рационального проектирования, и сварка в полевых условиях: а — мост с плоскими фермами; б — мост с коробчатыми фермами

пространстве) относительных трудовых затрат и стоимости стали. До 1980-х годов трудовые затраты были невысокими по сравнению со стоимостью стали. Таким образом, создана комплексная конструкция с целевым изменением ширины и толщины полок для минимального использования материала и достижения наиболее рационального перехода между решетчатыми фермами, при этом для соединения ферм сваривали дополнительные элементы, что привело к увеличению объема сварочных работ. В последнее время трудовые затраты увеличились. Были спроектированы простые сварные конструкции с тем, чтобы сократить количество сварочных операций, несмотря на то, что это приводит к повышению расхода стали. Толщина полок фермы увеличилась до 100 мм, при этом стало невозможным использовать способ соединения ферм жесткости фрикционным зажимом с использованием болтов высокого натяжения. Таким образом, применение сварки стало неизбежным. На рис. 4, б также показана сварка толстых мостовых ферм в полевых условиях. Благодаря использованию для строительства моста толстолистовой стали ТМСП с временным сопротивлением 590 МПа значения S_{eq} и P_{cm} были снижены, сварку проводили без предварительного нагрева даже при толщине металла до 100 мм.

Мост через реку Иртыш в Казахстане построен японской строительной фирмой. Блоки ферм жесткости изготовлялись в Японии и перевозили к месту строительства по Сибирской железной дороге. Здесь их собирали в более крупные блоки, затем поднимали, соединяли с тросовыми подвесками и сваривали друг с другом. Материалы для строительства моста рассчитаны на эксплуатацию при температуре до -50°C . При строительстве моста использовали сталь ТМСП, при этом тепловложение при сварке было ограничено до определенного уровня.

При строительстве главного пилона подвесного моста блоки пилон обычно соединяли посредством фрикционного зажима с применением болтов высокого натяжения, при строительстве моста Хакучо впервые конструкции соединили с помощью сварки. Сварку применяли для получения пилон с гладкими и красивыми поверхностями. При строительстве пилон подвесного моста требовалась точность менее 1/5000 (20 мм на 100 м), а для предотвращения сварочных деформаций применяли специальные меры. Степень усадки при сварке соединений на блоках зависела от режима сварки. Чтобы снизить до минимума изгиб пилон, необходимо было обеспечить равномерное сжатие блока по всему сечению. Для другого подвесного моста пилоны высотой 100 м изготовляли в заводских условиях, затем их транспортировали

на место строительства по морю и устанавливали пакетами с помощью плавучего крана.

В 2003 г. вдоль моста Чокинес в США был построен новый подвесной мост. Блоки ферм массой до 600 т изготавливали в Японии и зимой транспортировали по северной части Тихого океана. Блоки соединяли друг с другом непосредственно на месте строительства. При сварке в цеховых условиях листов палубного настила к сварным соединениям на сквозных ребрах жесткости предъявлялись очень высокие требования к качеству с целью предупреждения разрушений вследствие усталости.

Технологии лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием. В Европе лазерную сварку широко используют в судостроении, а сварку трением с перемешиванием все активнее применяют для строительства судов. В Японии лазерная сварка и сварка трением с перемешиванием в меньшей степени популярны, чем в Европе, поскольку на японских судовых поверхностях строят в основном океанские корабли. Однако в других отраслях промышленности Японии оба эти процесса сварки находят все более широкое применение.

На рис. 5 [9] показано применение сварки трением с перемешиванием для строительства сверхбыстрого поезда-пули поезда (Shin-kan-sen) и лазерной сварки для производства железнодорожных вагонов. Сварка трением с перемешиванием активно внедряется в Японии для изготовления железнодорожных вагонов. В начальный период эксплуатации поезда-пули в качестве конструкционного материала для кузова вагона использовали сталь, конструкция кузовов вагонов была полумонокорпусного (полумонокорпусного) типа, для чего применяли точечную сварку. В настоящее время для изготовления кузовов вагонов используют алюминиевые сплавы, благодаря этому снижается масса конструкции и повышается скорость сварки. Конструкция кузова изменилась от стальной полумонокорпусной до сварной с двойной обшивкой, полученной из прессованных алюминиевых прутков. Приведенные данные свидетельствуют о том, что изменение сварочных процессов вызывает изменение конструкции. Лазерная сварка заменяет точечную сварку при изготовлении железнодорожных вагонов с целью повышения их конструкционной прочности и безопасности [10]. В последнее время лазерную сварку также применяют для соединения прессованных прутков из алюминиевых сплавов, из которых изготавливают двойную обшивку железнодорожных вагонов.

Техносуперлайнер — сверхскоростной корабль, первый и пока единственный японский корабль, сваренный с применением сварки трением с перемешиванием. Внедрение этого способа сварки в данной отрасли в Японии идет мед-

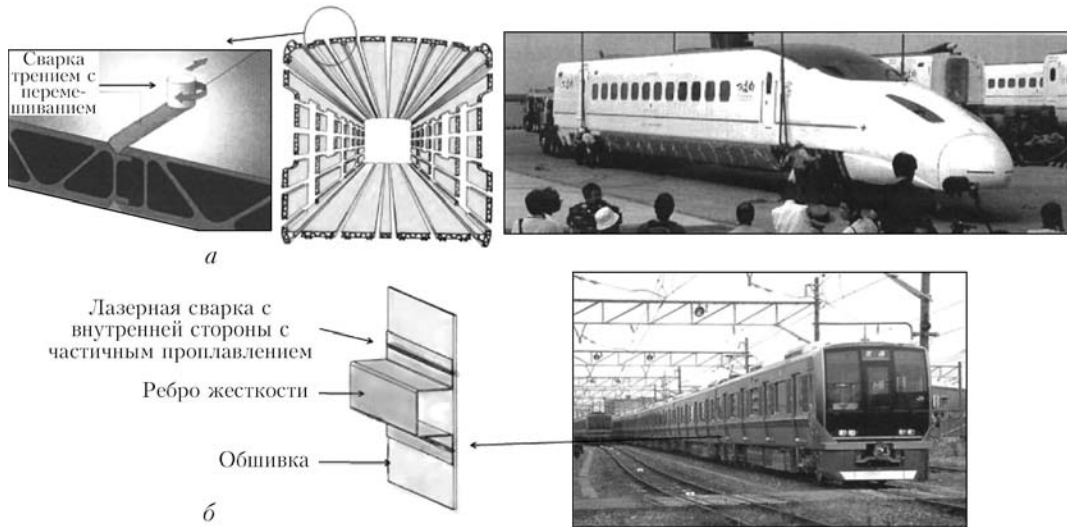


Рис. 5. Применение сварки трением с перемешиванием для строительства японского поезда-пули (а) и лазерной сварки при строительстве железнодорожных вагонов (б)

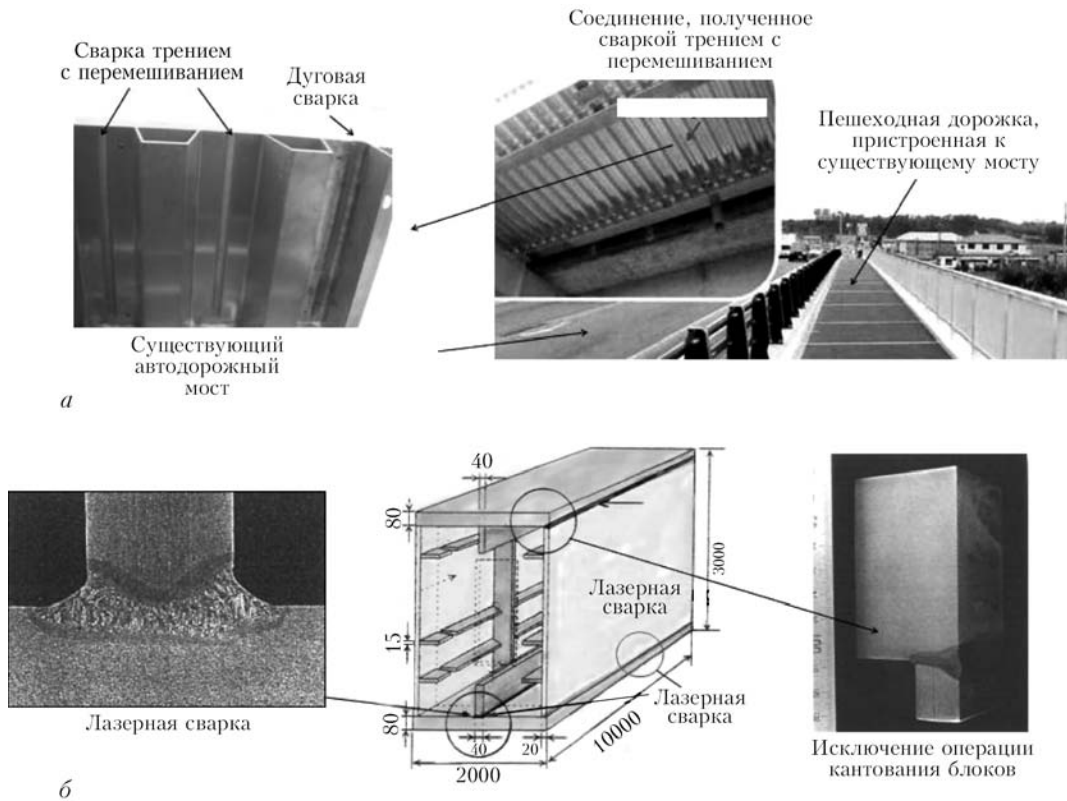


Рис. 6. Применение сварки трением с перемешиванием для получения элемента моста (а) и концепция использования лазерной сварки (б)

леннее, чем в Европе, поскольку спрос здесь на скоростные алюминиевые корабли меньше, чем в Европе. При строительстве верхних палуб на суперлайнере использовали в большом количестве панели жесткости, сваренные указанным способом сварки из прессованных прутков [11].

На рис. 6 представлено применение сварки трением с перемешиванием для получения элемента моста, а также концепция использования лазерной сварки [12]. На рис. 6, а показан мост с пешеходной дорожкой, которую пристроили к

уже существующему мосту. Для снижения массы конструкции дороги из новых блоков использовали плоские алюминиевые листы настила, соединенные с прессованными прутками сваркой трением с перемешиванием, которую выполняли в поперечном направлении по отношению к осевому направлению моста. Ширина свариваемой панели ограничивалась 2...3 мм. Для получения блока с помощью дуговой сваркой соединяли несколько панелей, сваренных сваркой трением с перемешиванием, которую выполнял не изготови-

тель моста, а изготовитель алюминия. В настоящее время этот процесс для строительства мостов применяется ограничено. На рис. 6, б представлена концепция использования лазерной сварки для получения коробчатой фермы моста. Этот способ сварки для строительства мостов применяется ограничено. Лазерная сварка позволяет получать большие блоки мостов без трудоемких операций кантования, которая необходима при дуговой сварке. Кроме того, предполагается, что лазерная сварка ребер жесткости будет способствовать повышению их временного сопротивления.

Таким образом, в настоящей работе изложены последние тенденции применения сварочных технологий при проектировании и изготовлении в Японии стальных конструкций таких, как корабли и мосты. Рассмотрено также применение для этих целей новых процессов сварки (лазерной и трением с перемешиванием). Следует отметить, что сталь высокого качества, предлагаемая японскими сталеплавильщиками, помогает изготовителям стальных конструкций обеспечивать высокие эксплуатационные характеристики их продукции,

In this paper, a trend of welding technologies in design and manufacture of steel structures, such as ships and bridges, is reviewed. Further, the recent advance in welding atomization and application of new welding processes, such as laser and friction stir welding, in the Japanese industries is presented.

что способствует дальнейшему прогрессу в области разработок производственных технологий в Японии, и хотя данный обзор ограничен рассмотрением строительства кораблей и мостов, авторы надеются, что настоящая работа будет полезна для специалистов других сфер.

1. *Sugitani Y.* The technical trends and the future perspective of the shipbuilding industries in Japan: NKK technical reports.
2. *Suga T.* Welding consumables // J. of JWS. — 1998. — **67**, № 8.
3. *Koga S.* The history of manufacturing — ships // Ibid. — 2000. — **69**, № 8.
4. *Yurioka N.* Welding of TMCP steel // Ibid. — 1992. — **61**, № 4.
5. *Shiga C.* Progress of weldable tough high-strength steel // Ibid. — 1996. — **65**, № 3.
6. *SR 193 Research Committee:* Research on effective use of newly developed high strength steel of a HT50 class / Japan Shipbuilding Research Institute. — 1983–1985.
7. *Steve's* marine disaster pages, the «MSC CAPLA». — 2003.
8. *Battle ships in the world.* — 2005. — № 640.
9. *Hitachi Ltd.* Technical Report.
10. *Application of laser welding techniques to railway vehicles / A. Hara et al.* // Forum on laser material processing 2006.
11. *News report on TSL // The Ogasawara news.*
12. *Light Metal Welding.* — 2008. — **46**, № 1.

Поступила в редакцию 23.02.2008

УДК 621.791.052-192;621.791:658.562]:311

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ — ОСНОВНОЙ ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Академик РАН **Н. П. АЛЕШИН** (НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ)

Диагностика является неотъемлемой частью технологического процесса при производстве материалов и изделий. Наличие высококачественных материалов и технологий изготовления конструкций при отсутствии эффективных методов диагностики не гарантирует безаварийной эксплуатации. Изложены процедура и средства технического освидетельствования различных объектов, разработанных в НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, сварные конструкции, остаточный ресурс, техническое освидетельствование, дефектоскопическое оборудование, методики расчета

По данным США, стоимость контрольных операций при производстве изделий военно-промышленного комплекса достигает 25...35 % общей стоимости изделий. В строительной индустрии эти затраты составляют 10...12 %. В России затраты на контроль и диагностику, как правило, ниже в 15...20 раз.

В настоящее время значение неразрушающих методов контроля и диагностики особенно велико, поскольку изношенность парка технологического оборудования в отдельных случаях превышает 65 %. В ближайшее время для предотвращения аварий необходимо создать технологии и оборудование для оценки остаточного ресурса наиболее опасных эксплуатируемых объектов. Решению этой проблемы большое внимание уделяют как за рубежом (Германия, Украина, Китай и др.), так и в России.

В России получены хорошие результаты и в части создания высокоинформативного дефектос-

© Н. П. Алешин, 2008