

История развития сварных конструкций

Способ получения неразъемных соединений деталей путем сварки был известен людям еще в глубокой древности. Первым способом получения неразъемных соединений был кузнечная сварка. Прежде всего, кузнечная сварка служила для увеличения размеров заготовок. При изготовлении медных бус концы изогнутой на круглой оправке полосы соединяли внахлестку и сваривали кузнечным способом. Сварку меди применяли не только для изготовления вещей, но и для их починки, наращивания изношенных краев.

Особенно высокого развития и большого разнообразия достигает техника получения неразъемных соединений металлов в железном веке. Древнейшие изделия из железа, относящиеся к IV тыс. до н. э., были обнаружены в Египте.

В VIII—VII вв. до н. э. в Восточной Европе появляются биметаллические мечи и кинжалы, при изготовлении которых соединяли бронзу и железо (рис. 1).

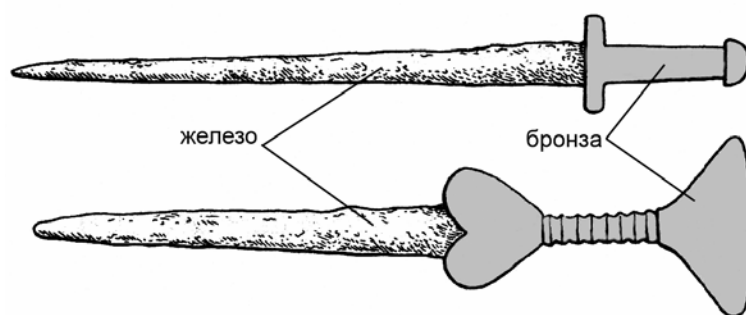


Рис. 1. Биметаллический сварной меч.

В скифскую эпоху (VII—III вв. до н. э.) была освоена кузнечная сварка деталей из сталей с разным содержанием углерода с целью улучшения качества лезвия режущих и рубящих орудий. Сочетание в конструкции режущего инструмента (меч, клинок, топор) твердой сердцевины (высокоуглеродистая сталь) и мягкого поверхностного слоя (низкоуглеродистая сталь) не только способствовало повышению прочности, но и обеспечивало появление эффекта самозатачивания лезвия. Таким образом, было реализовано главное преиму-

щество применения сварки – возможность получения конструкции, в которой свойства отдельных участков соответствовали эксплуатационному назначению.

Интересна технология изготовления оружейных стволов с помощью кузнечной сварки, получившая развитие в конце 15 века. Выкованный из крицы¹ железный лист скручивали на железной оправке в трубу и сваривали продольным швом внахлестку. Затем на эту трубу наваривали еще одну или две трубы большего диаметра, следя за тем, чтобы продольные сварные швы располагались в разных местах. Выкованные таким образом трубы-заготовки были короткими. Поэтому для получения достаточно длинного ствола орудий несколько таких заготовок соединяли между собой при помощи сварки. Для этого соответствующие концы труб выковывали в виде внутреннего или наружного конуса, соединяли и сваривали внахлестку. В казенную часть ствола вваривали коническую железную заглушку. Исследования микроструктуры сварных швов древнерусских пищалей XV в. показали, что качество сварки было очень хорошим.

В XIX в. кузнечная сварка в промышленности была механизирована. Ручной труд молотобойца заменяется работой машин, механическими молотами с весом бойка до 1 т, производящими от 100 до 400 ударов в минуту. Технология кузнечной сварки также была усовершенствована. Кузнечную сварку использовали для получения биметаллических листов. Листы разных металлов собирали в пакет, который нагревали в печах и пропускали через валки прокатного стана. Следует отметить, что этот способ получения биметаллического листа сохранился до наших дней.

Значительное применение кузнечная сварка находила в производстве сварных стальных труб с прямолинейным продольным нахлесточным швом. Кромки листовой заготовки предварительно скашивали, нагревали в печи, за-

¹ Твердая губчатая масса железа с малым содержанием углерода, серы, фосфора, кремния, со шлаковыми включениями, заполняющими поры. В древние времена исходный материал для получения железных изделий.

тем прокатывали на сердечнике. Таким способом изготавливали трубы диаметром от 40 мм до нескольких сотен миллиметров. Помимо прямошовных, изготавливали и спирально-шовные трубы диаметром до 600 мм. Для повышения производительности сварки и качества сварного соединения начали применять кузнечную сварку с нагревом кромок горелками, работавшими на водяном газе с воздухом. Нагретые кромки сваривали проковкой механическими молотами или прокаткой нажимными роликами.

Следует обратить внимание на то, что с момента становления сварки как технологического процесса, она была направлена на решение основных задач, актуальных и в настоящее время:

- обеспечение возможности получения крупных конструкций из мелких компонентов;
- соединение материалов с различными свойствами в одной конструкции;
- ремонт и восстановление отдельных участков конструкций;
- снижение трудоемкости изготовления конструкции.

В конце XIX в. и в начале XX в. на основе достижений в области физики и электротехники наблюдается интенсивное развитие технологий сварки. За короткий срок был создан ряд новых способов сварки, являющихся основой сварочной техники и в наше время.

Источником нагрева для самого распространенного до настоящего времени вида сварки служит электрическая дуга. Честь открытия явления электродугового разряда принадлежит русскому ученому академику В. В. Петрову. Однако возможность практической реализации технологического процесса дуговой сварки появилась благодаря работам русских изобретателей Н.Н. Бенардоса и Н.Г. Славянова.

Николай Николаевич Бенардос предложил и осуществил в 1880-1890 гг. дуговую сварку неплавящимся электродом дугой прямого и косвенного дей-

ствия. В 1887 г. он предложил основные виды электроконтактной сварки – точечную и роликовую.

Николай Гаврилович Славянов в конце 1880-х годов осуществил и широко внедрил электродуговую отливку металлических изделий и сварку плавящимся металлическим электродом, разработал основы металлургии сварочного процесса и, в частности, предложил вести сварку под шлаковой защитой. Он создал первый в мире автомат для дуговой сварки металлов плавящимся электродом. Так называемый «плавильник Славянова».

Изобретения Н.Н. Бенардоса и Н.Г. Славянова получили мировое признание, они были запатентованы во многих промышленных странах Европы и в Америке. Возможности дуговой сварки плавлением были высоко оценены на выставках в России, на Всемирных выставках в Чикаго и Париже. В 1893 г. на всемирной выставке в Чикаго Н.Г. Славянов был награжден дипломом и золотой медалью за изобретение электродуговой сварки металлов.

Работы Н.Н. Бенардоса и Н.Г. Славянова, наглядно демонстрировавшие преимущества технологии электрической сварки перед другими способами соединения металлов, послужили толчком к широкому распространению этого технологического процесса и росту темпов объема его применения.

С 1890 по 1892 г. в мастерских Пермских пушечных заводов сваркой было отремонтировано 1631 изделие общим весом 16 953 пуда. Вес наиболее тяжелой детали достигал 425 пудов. Израсходовано электродов 685 пудов, расплавленных за 887 ч.

Несмотря на значительные успехи русских изобретателей и инженеров в деле разработки и внедрения дуговой электросварки, к началу XX в. промышленно развитые страны Европы и США начали опережать Россию по объему применения сварки. Появляются новые способы сварки: сварка покрытым электродом (Oscar Kjellberg 1907г.).

Первую кислородно-ацетиленовую сварочную горелку сконструировал французский инженер Э. Фуше, который получил на неё патент в Германии в

1903. В России этот способ стал известен предположительно к 1905, а получил распространение к 1911.

Сварка начинает находить применение не только при ремонте, но и для изготовления и монтажа крупных конструкций.

В Швеции появилась плавучая сварочная мастерская "ЭСАБ – IV", предназначенная для ремонта морских судов² (1907 г.);

В США (Филадельфия) предпринимаются попытки проложить с использованием кислородно-ацетиленовой сварки трубопровод длиной 11 миль (1911 г.); спустя год на одном из автомобильных заводов США применили точечную сварку для соединения деталей корпуса автомобиля.

В 1918 году морской регистр Лойда дает разрешение на применение дуговой сварки в судостроении.

В 1920 году был спущен на воду сухогруз "Fulagar" водоизмещением 421 т.

Сварку применяют при строительстве эстакад, мостов, резервуаров, сферических газгольдеров, протяженных трубопроводов, в том числе паропроводов.

Широкому распространению сварных конструкций в Советском Союзе способствовали работы Д.А. Дульчевского, Е.О. Патона, В.П. Вологодина, Г.А. Николаева, Н.О. Окерблома. В 30-х годах XX-го столетия сварка начала успешно вытеснять другие способы соединения деталей, особенно соединения на заклепках, в крупных строительных конструкциях, таких, как автодорожные и железнодорожные мосты. Были спроектированы и построены мосты с пролетом 45 м, затем 87,6 м.

К концу 20-х годов XX столетия сварочное производство приобретает черты самостоятельной отрасли. Дальнейшее ее развитие требовало разработ-

² Фирма ESAB в настоящее время является ведущим в мире производителем сварочного оборудования и сварочных материалов.

ки специальных правил проектирования и изготовления сварных конструкций; неразрушающих методов контроля качества сварных соединений.

Появляются стандарты «Испытание сварных швов» (1921 г.); «Правила конструирования сварных котлов» (1925 г.); «Правила сварки плавлением и газовой резки при строительстве зданий» (1928 г. США); «Правила Американского сварочного общества³ обозначения сварных швов на чертежах» (1929 г.); были внесены изменения в Boiler Code (свод правил проектирования и изготовления котлов и сосудов Американского общества инженеров механиков) утвердившие правила применения радиографического контроля сварных соединений (1931 г.); стандарт на сварочные электроды (1935 г. Великобритания). В 1933 году была издана монография «Методы расчета электросварных соединений» (Г.К. Татур, Н.Н. Рыкалин). В том же году фирма Lincoln Electric Co. публикует справочник по проектированию сварных соединений и применению дуговой сварки (Procedure Handbook of Arc Welding Design and Fabrication).

В 1936 году Американское сварочное общество (AWS) выпускает документ, регламентирующий проектирование, сооружение, реконструкцию и ремонт автомобильных и железнодорожных мостов с применением сварки плавлением. В том же году AWS подготовила документ «Временные правила оценки сварочных процессов и испытания операторов-сварщиков» (Tentative Rules for the Qualification of Welding Processes and Testing of Welding Operators)

Во второй половине XX-го века сварка заняла одно из лидирующих мест среди технологических процессов, благодаря своим уникальным возможностям соединять практически любые металлы и неметаллические материалы. Сваркой в мире занято не менее 5 млн. человек, из них 70-80% на электродуговых процессах.

³ American welding society (AWS) – Американское сварочное общество, играет ведущую роль в координации сварочного производства США и активно влияет на развитие производства сварных конструкций во всем мире.

Более половины валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки и родственных технологий, к которым относят наплавку, пайку, резку, нанесение покрытий, склеивание различных материалов. Долю различных способов соединения деталей, применяемых в промышленности и строительстве, иллюстрирует рис. 2.

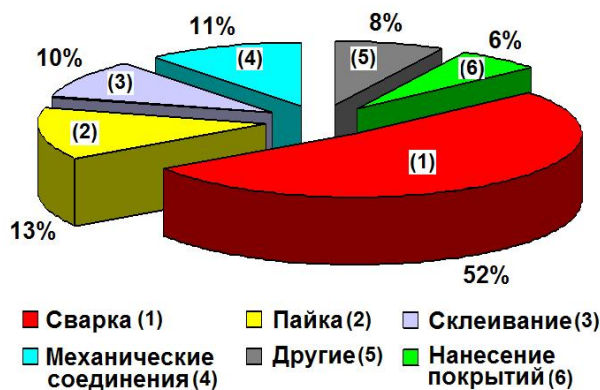


Рис. 2. Доля способов соединения деталей

Только в России общий объем сварных металлических конструкций достигает 800 млн. т. До 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений. Толщина свариваемых деталей колеблется от микронов до метров, масса сварных конструкций – от долей грамма до сотен и тысяч тонн. Зачастую сварка является единственно возможным или наиболее эффективным способом создания неразъемных соединений конструкционных материалов и получения заготовок, максимально приближенных к оптимальной форме готовой детали или конструкции.

Масштабы применения сварки при сооружении современных конструкций характеризуют следующие примеры. В 1976г. в США (фирма Джeneral Дайнэмикс) было завершено строительство сферического газгольдера из алюминиевого сплава, установленного на специальном танкере для транспортировки природного газа. Диаметр газгольдера составлял 36 м, длина сварных швов – 48,6 миль, вес наплавленного металла 3166 кг.

В мире проложено около 1 млн. км сварных газопроводов. Например, протяженность трубопровода, проложенного в 1975 году на Аляске, – 798

милей, диаметр – 1220 мм. На строительстве трубопровода было занято 17 000 человек – 6% населения Аляски. Сварено 38 000 сварных стыков. Израсходовано 36 000 кг сварочной проволоки. В 2002 г. завершено строительство газопровода «Голубой поток» (Россия – Турция). Протяженность сухопутной части трубопровода составила 1140 км, диаметр 1220 мм. По дну Черного моря проложено две нитки трубопровода из труб диаметром 596 мм. Протяженность каждой нитки морской части – 396 км.

Сварные конструкции широко используются в строительстве крупных сооружений, например, современных крытых стадионов, высотных зданий. Печально известные башни близнецы Всемирного торгового центра в Нью-Йорке содержали 176 000 т стальных сварных конструкций. При сооружении 100 – этажного здания в Чикаго было израсходовано почти 140 т сварочных материалов, причем только на монтаже было наплавлено 74,25 т металла. Благодаря применению сварки в среде CO₂ порошковой проволокой производительность сварки достигала 40,5 кг наплавленного металла в день на одного оператора. При сооружении высотного здания штаб-квартиры Bank of America в Сан Франциске с помощью электрошлаковой сварки было выполнено 24 000 швов.

Металлоконструкции Бережковского мостового перехода через реку Москву в г. Москве, русловая часть которого состоит из двух автономных неразрезных пролетных строений длиной по 365 м и шириной 21 и 17 м с общей массой около 7 тыс. тонн, имеют 18 км сварных швов. Из них 11,5 км швов выполнены автоматической сваркой.

Примером гигантских сварных конструкций, работающих в сложных условиях нагружения, являются раздвижные крыши и навесы над стадионами. Над трибунами Большой спортивной арены в Лужниках на 72 колоннах укреплен козырек массой 15 тыс. тонн.

Покрытие представляет собой пространственную систему, состоящую из внутреннего и наружного овалообразного контуров и системы радиально-

кольцевых ребер, размеры главных осей 247,8х308,6 м. Стрела подъема куполообразного покрытия составляет 23,4 м, а расстояние от низа конструкции до поля стадиона -35м. Общий периметр наружного контура покрытия достигает 895 м, вылет пространственного козырька – 63,5 м. Наружный контур образован из коробчатых блоков замкнутого сечения 2х5 м. Внутренний контур решен в виде сквозной пространственной системы трапециевидной формы высотой 10 м, шириной 6 и 3 м (в нижней части).

Сварка находит все новые и новые области применения, например, в архитектуре или при сооружении скульптурных композиций. Сделаны первые попытки осуществления сварки в космосе. Дуговая сварка плавящимся электродом стала одним из трех способов, испытанных в 1969 г. на космическом корабле «Союз-6» космонавтом В. Кубасовым. В 1984 космонавт Светлана Савицкая удачно опробовала применение электроннолучевой сварки в открытом космическом пространстве, используя ручной пистолет.

Реальностью стало применение сварки в медицине - сварка сетчатки глаза, сварка и резка костей, других биологических тканей. Разработана технология микроплазменной сварки сердечных клапанов.

Сварные конструкции работают при сверхвысоких и сверхнизких температурах, при высоких давлениях и в условиях космического вакуума.

В последние десятилетия наметились существенные изменения в структуре способов сварки, используемых при производстве сварных конструкций. Резко возросло применение сварки в защитных газах (в CO₂, аргоне, смеси активных газов), в основном, за счет сокращения объемов применения ручной дуговой сварки. В связи с интенсивным развитием электронной промышленности и компьютерных технологий во всем мире растет применение промышленных роботов в сварочном производстве.

В 2001 году во всем мире находилось в эксплуатации более 1 млн. промышленных роботов. Промышленные роботы в настоящее время стали неотъемлемой частью сварочного производства в автомобильной промышленности.

Исследования, проведенные французскими специалистами, показали, что, если в настоящее время исключить из производства роботизированные системы, то стоимость автомобилей повысится на 20 процентов. По данным японских автомобилестроительных фирм, производительность труда при автоматизации сварочных процессов, за счёт внедрения сварочных роботов, повысилась за 10 лет примерно в 4 раза.

Широкое распространение механизированных и автоматизированных методов сварки требует разработки специальных методов проектирования сварных конструкций и соединений, учитывающих специфику применяемых методов сварки. Например, применение электрошлаковой сварки требует вертикального расположения сварных соединений; применение автоматической сварки под флюсом предопределяет необходимость расположения швов в нижнем положении; применение неадаптивных промышленных роботов для дуговой сварки заставляет конструктора просчитывать размерные цепи с тем, чтобы гарантировать движение робота по стыку; и др.

Несмотря на то, что к началу XXI века сварочное производство достигло значительных успехов как в отношении уровня механизации и автоматизации работ, так и в отношении качества выпускаемой продукции, сварное соединение, по-прежнему, остается «слабым звеном» конструкции.

На долю сварных соединений, как правило, приходится несколько сотых долей массы всей металлической конструкции, но именно сварные соединения нередко (по некоторым данным до 10 – 35% случаев) являются источником разрушения конструкций. Например, частота разрушений нефтепроводов в Западной Европе составляет 0,55 случаев на 1000 км в год. Как показывает практика, последствия таких разрушений могут быть достаточно серьезные.

Одной из основных причин разрушения сварных конструкций является появление дефектов при выполнении сварных соединений, создающих концентрацию напряжений. К сожалению, современное состояние сварочных технологий не позволяет реализовать на практике концепцию «6-sigma

quality», т.е. когда 99,999% сварных соединений соответствует нормативным требованиям к качеству.

Радиографический контроль 30 000 швов магистрального трубопровода, проходящего через Аляску, выявил 4000 сварных соединений, содержащих дефекты, размеры которых превышают требования норматива API 1104 (стандарт Американского нефтяного института – один из основных стандартов, признанных в мировой практике строительства магистральных трубопроводов).

Следует отметить, что присутствие в конструкции дефектов сварки далеко не всегда является единственной причиной ее разрушения. Благодаря тому, что современные материалы обладают достаточно высокой пластичностью, концентрация напряжений около дефектов существенно снижается, что уменьшает их опасность. Известны случаи достаточно длительной службы сварной конструкции, содержащей наиболее опасные дефекты – трещины. Разрушение конструкций, как правило, является следствием сочетания нескольких неблагоприятных факторов, к числу которых можно отнести ошибки проектировщика, недостаточная изученность условий эксплуатации, изменение механических характеристик металла с течением времени, технологическая наследственность сварных соединений, выражающаяся в ухудшении механических свойств металла в результате протекания термомодеформационных процессов при сварке.

Недостаточная изученность роли технологической наследственности сварных соединений иногда ставит под сомнение целесообразность использования технологических процессов сварки даже, несмотря на очевидную их экономическую целесообразность. Так, например, в 1977 году Управление Федеральными автомобильными дорогами США ввело ограничение на применение электрошлаковой сварки при изготовлении мостовых конструкций после обнаружения трещин при обследовании автомобильного моста в Питтсбурге. Вероятно, в данном случае основную роль сыграл тот факт, что элек-

трошлаковая сварка сопровождается большим вводом тепла, малой скоростью охлаждения металла шва и околошовной зоны, что может вызывать рост зерна и снижение запаса пластичности.

На отрицательную роль технологической наследственности сварных соединений обратили внимание еще на стадии формирования сварки как самостоятельного технологического процесса. Проведенные в 20-е – 30-е годы научные исследования показали, что контакт кислорода и азота с расплавленным металлом может привести к охрупчиванию металла шва и появлению пористости, а наличие водорода в сварочных электродах способствует появлению трещин при сварке.

Исследования, проведенные в 1960 – 70 годах, убедительно доказали, что прочность сварной конструкции далеко не всегда соответствует прочности материала, из которого она изготовлена. Чем выше прочность конструкционного материала, тем выше вероятность такого несовпадения. Причины этого тесно связаны с вопросами технологической наследственности сварных соединений и с тем фактом, что повышение прочности конструкционного материала, как правило, сопровождается снижением его запаса пластичности. Теоретическое и экспериментальное изучение этого эффекта привело к разработке теории конструкционной прочности сварных соединений⁴. В более поздние годы методы проектирования, основанные на идеологии конструкционной прочности, названные “Structural Integrity”, получили широкое распространение на Западе.

Очевидно, что не учитывать роль технологической наследственности сварных соединений означает формально подходить к вопросам обеспечения надежности и работоспособности проектируемой сварной конструкции. Более того, на стадии проектирования необходимо и возможно создать предпосылки к тому, чтобы свести к минимуму неблагоприятную роль технологической

⁴ В Советском Союзе теория конструкционной прочности сварных соединений разработана школой МВТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора С.А. Куркина.

наследственности сварных соединений. Опытный специалист по проектированию сварных конструкций, используя методы конструктивно-технологического проектирования⁵, когда одновременно с проектированием сварных соединений решаются вопросы оптимизации технологического процесса, может активно влиять на принятие технологических решений.

Именно идеология конструкционной прочности сварных соединений и методы конструктивно-технологического проектирования должны стать основой при изучении дисциплины «Проектирование сварных конструкций».

Конечной целью инженерной деятельности специалиста сварочного производства является обеспечение качества выпускаемой продукции и снижение затрат на ее производство при обеспечении безопасных условий труда. Эффективность принимаемых технических решений существенно зависит от того, на каком этапе жизненного цикла сварной конструкции принимаются эти решения.

Жизненный цикл сварной конструкции включает несколько этапов: проектирование; разработка технологии изготовления; изготовление конструкции; эксплуатация (рис. 3).

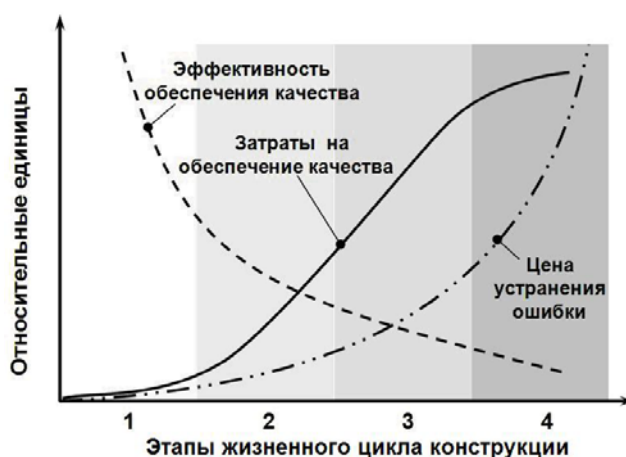


Рис. 3. Эффективность принятия решения на различных этапах жизненного цикла конструкции:

⁵ Методология конструктивно-технологического проектирования была заложена работами профессора О.А. Окерблома в 70-х годах прошлого века.

1 – проектирование; 2 – разработка технологии;
3 –изготовление; 4 – эксплуатация.

Очевидно, что наибольшая эффективность обеспечения качества сварной конструкции может быть достигнута на стадии проектирования конструкции, когда можно предусмотреть и исключить негативное влияние технологии сварки на свойства сварного соединения. Кроме того, на этом этапе материальные затраты на принятие решения минимальны. По мере продвижения по жизненному циклу увеличиваются затраты на обеспечение качества и растет цена ошибки решения, принятого на стадии проектирования. Решения, принятые на стадии проектирования, во многих случаях определяют эффективность производства и эксплуатации конструкции. Именно по этой причине основной целью, которую должен ставить перед собой специалист сварочного производства при проектировании сварных конструкций является обеспечение качества и снижение затрат на производство.

При проектировании сварных конструкций должны быть решены следующие задачи:

- обеспечение прочности сварных соединений, работающих в составе конструкции;
- обеспечение надежности и работоспособности сварных соединений с учетом условий эксплуатации конструкции;
- обеспечение технологичности конструкции на всех этапах ее жизненного цикла;
- удовлетворение специальных требований к сварным соединениям и конструкциям (например, требования к магнитным свойствам, к коэффициенту температурного расширения металла шва и основного металла и др.).

Во многих случаях специалист сварочного производства не принимает непосредственное участие в проектировании сварных конструкций, но, являясь узким специалистом, он может и должен оказывать влияние на принятие

конструктором решений с тем, чтобы предотвратить ошибки, которые придется устранять на более поздних стадиях: при разработке технологии и при изготовлении. Кроме того, специалист сварочного производства должен четко представлять к каким последствиям в отношении прочности и надежности сварной конструкции могут привести его неправильные действия как технолога.

Именно в этом представляется основная цель изучения дисциплины «Проектирование сварных конструкций» студентами специальности 150202 – «Оборудование и технология сварочного производства». Решить эти проблемы может только специалист, хорошо подготовленный теоретически и умеющий применять эти знания на практике, ибо "увлекающийся практикой без науки - словно кормчий, ступающий на корабль без руля и компаса, он никогда не уверен, куда «приплывет» (Леонардо да Винчи).

После изучения дисциплины «Проектирование сварных конструкций» будущий инженер должен иметь знания и умения, необходимые для участия в проектировании сварных конструкций в качестве **эксперта**, способного дать оценку технологических возможностей изготовления конструкции и обеспечения требуемых характеристик прочности и надежности сварных соединений.

Он должен:

- **знать**: область применения, технические и экономические преимущества сварных конструкций; материалы, применяемые для сварных конструкций и возможные изменения их механических свойств под влиянием термомеханического цикла сварки; методы расчета сварных соединений в зависимости от условий их работы в конструкции; методы оценки напряженно-деформированного состояния различных зон сварного соединения; механизм образования напряжений и деформаций при сварке и приемы устранения их негативного влияния на работоспособность конструкции; методы оценки и приемы обеспечения заданного уровня прочности и надежности сварных со-

единений; приемы обеспечения технологичности конструкции на стадии ее проектирования; компьютерные методы моделирования и анализа при проектировании сварных соединений;

- **уметь:** произвести расчет прочности сварного соединения и составить технологическую часть задания на проектирование сварной конструкции; оценить принятые при проектировании конструкции решения с позиции обеспечения прочности, надежности и технологичности сварных соединений и внести обоснованные предложения, направленные на их совершенствование; проводить исследования работоспособности сварных соединений.

Изучение данной дисциплины базируется на знаниях, полученных при изучении следующих дисциплин: «Соппротивление материалов»; «Детали машин и основы конструирования»; «Теория сварочных процессов»; «Технологические основы сварки плавлением и давлением».

Полученные при изучении данной дисциплины знания послужат основой для дальнейшего формирования специалиста сварочного производства и будут углублены при последующем изучении дисциплин: «Производство сварных конструкций»; «Материалы и их поведение при сварке».