

УДК 621.791.011

Р. У. Хайбрахманов, Ю. С. Коробов, Д. Л. Ярошевич

Снижение деформаций в тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей на основе САЕ-анализа сварных соединений

Высокая конкуренция в области машиностроения требует изготовления облегченных тонколистовых конструкции из высокопрочных сталей с обеспечением геометрии определенной точности. Обеспечение заданной геометрии достижимо при совершенствовании мер снижения остаточных деформаций. Исследовано снижение деформации на основе анализа влияния жесткости прижима на напряженно-деформированное состояние сборки с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов. Получена модель прижима, позволяющая регулировать уровень остаточных напряжений и деформаций, подтвержденных экспериментальным путем.

Ключевые слова: моделирование процесса сварки, напряженно-деформированное состояние, высокопрочные стали, сварочное приспособление, метод конечных элементов.

Введение

Сварка тонколистовых деталей из высокопрочной стали мартенситно-бейнитного класса (полотнищ, балок, обечаек) сопровождается изменением геометрии сборки после сварки. Это связано с потерей устойчивости конструкции ввиду малой толщины деталей и возникающих напряжений в сварных соединениях вследствие теплового нагружения деталей сварочной дугой и структурных превращений, сопровождаемых изменением объема получаемой структуры. Распространенными методами по снижению деформации являются использование сварочного приспособления, выбор последовательности сборки, при которой обеспечивается максимальная жесткость конструкции, применение отрицательного прогиба.

Сварочное приспособление жестко закрепляет детали при сварке, что приводит к накоплению остаточных напряжений в шве и околошовной зоне. При достижении критического значения в сварном соединении образуются трещины. Поэтому предложена новая схема закрепления. Прижим во время сварки меняет свою жесткость, тем самым появляется возможность деформирования деталей, снижающая уровень остаточных напряжений. Получаем, что прижим адаптируется к распределению остаточных напряжений во время сварки. Адаптивный прижим можно реализовать в пневматических, гидравлических, а также в механических сварочных приспособлениях. Рассмотрим влияние адаптивных

прижимов на напряженно-деформированное состояние (НДС) обечайки.

Образование и распределение напряжений и деформаций в продольных однопроходных соединениях цилиндрических обечаек, когда они свариваются с закреплением в приспособлениях, принципиально не отличаются от случая сварки 2 листов встык [1, 2]. Подобное упрощение использовалось и в работе [3], где НДС после сварки продольного сварного соединения цистерны изучалось также на 2 пластинах.

При моделировании процесса сварки выполнен поиск усилия адаптивного прижима, благодаря которому после сварки уровень деформации поверхности детали в рассматриваемом сечении будет наименьшим, а значение остаточных напряжений повысится незначительно, чтобы не увеличить вероятность образования трещин.

Методы и материалы

Смоделирован процесс сварки обечайки, в которой выполняется продольный шов с помощью аргодуговой сварки неплавящимся электродом (рис. 1).

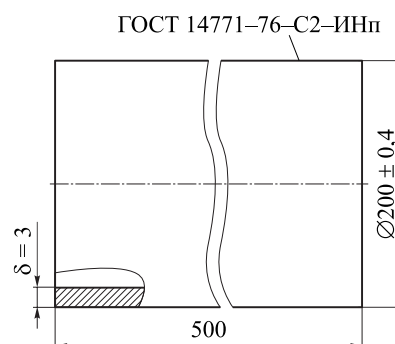


Рис. 1. Эскиз изделия



В качестве основного и сварочного материала используется высокопрочная сталь 30ХГСА.

Термомеханическую задачу решали относительно сварочных напряжений и деформаций для стыкового шва на пластинах с размерами $100 \times 100 \times 3$ мм. Эскиз исследуемой модели приведен на рис. 2.

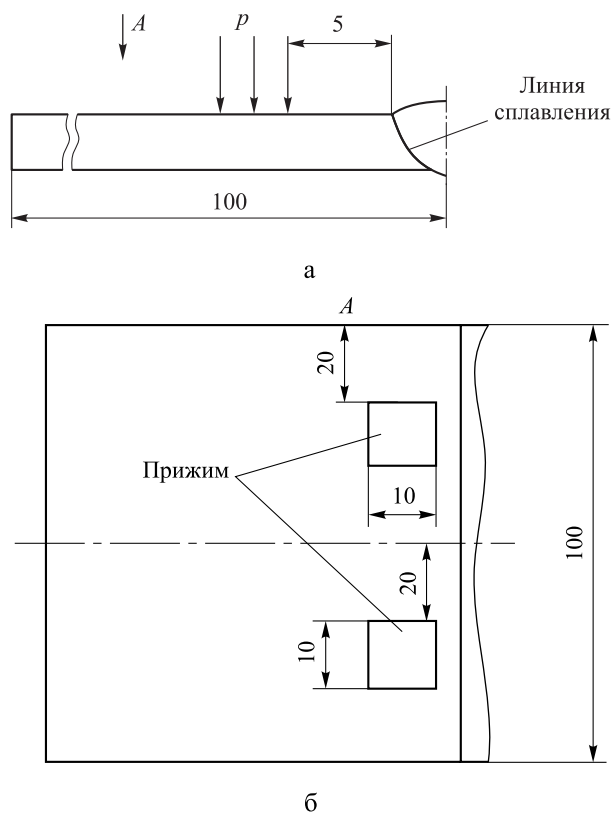


Рис. 2. Эскиз исследуемой модели

Ввиду однопроводной сварки пластин рассмотрен случай нагрева пластины линейным источником теплоты, когда температуру по толщине (δ) листа можно считать выровненной. Граничные условия заданы в виде теплового взаимодействия с окружающим воздухом с температурой 20°C , при этом отсутствует какое-либо движение воздуха.

Расчеты проведены в программном комплексе *SYSWELD*. Для решения тепловой и механической задачи были использованы объемные элементы призматической формы, суммарно образующие расчетную сетку (рис. 3). В области шва и зоны термического влияния (ЗТВ) расчетная сетка была сгущена по отношению к остальным ввиду значительных тепловых и механических градиентов поля.

Программная реализация прижима заключается в следующем. В прижатом состоянии во время сварки детали начнут перемещаться, что ограничивает прижим в участках соприкосновения. Следовательно, физический прижим в модели можно убрать, но при этом необходимо повысить жесткость деталей в участках фиксации. Усилие прижима исчисляется в килоньютонах, поэтому повышается влияние силы трения между деталью и сварочным столом на картину деформации детали при сварке. Сила трения

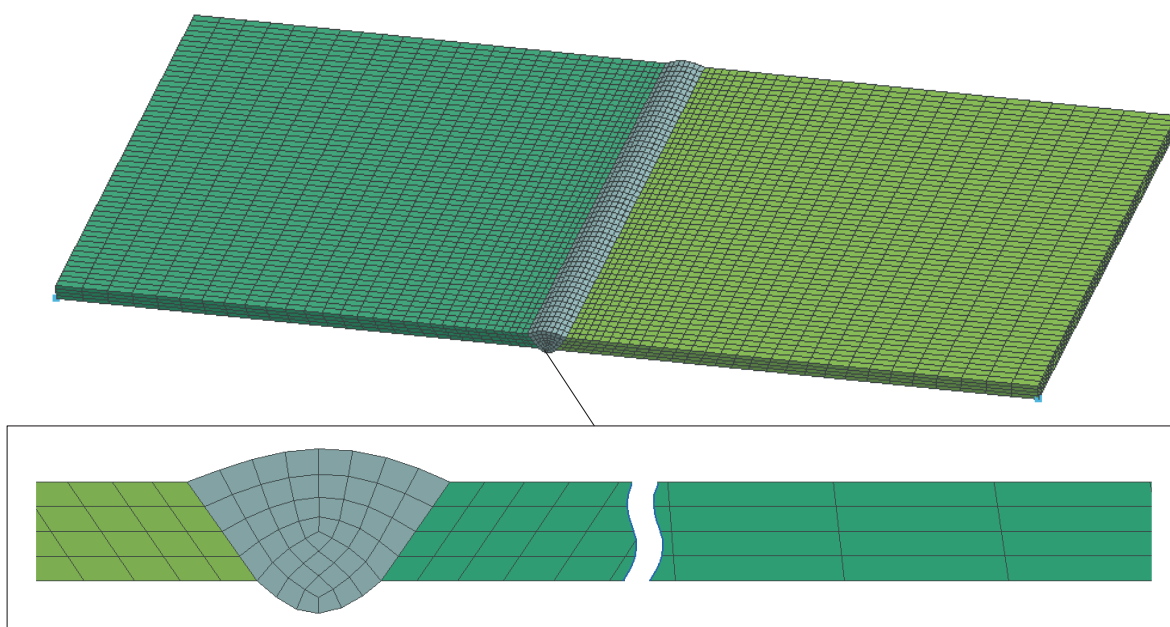
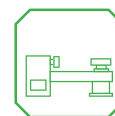


Рис. 3. Сетка для решения тепловой и механической задачи



увеличивает жесткость поверхности детали противоположному участку закрепления. Замена позволяет упростить модель, что в свою очередь, снизит сложность механических расчетов, а значит, и требования к вычислительной технике.

Схема нагружения включает в себя усилия от тепловой нагрузки и от 4 адаптивных прижимов. В модели места закрепления реализованы 4 плоскими участками действия прижима $P = 0 \dots 5000$ Н, в которых повышена жесткость согласно усилию прижима. Усилие в 0 Н соответствует свободным перемещениям, а 5000 Н предполагает, что усилие от теплового расширения будет недостаточным для преодоления действия прижима, а значит, закрепление можно рассматривать как жесткое. На таком же расстоянии от стыка сварного соединения с противоположной стороны пластины установлены участки повышенного действия силы притяжения.

Сила трения определялась по формуле [4]

$$F_{тр} = \mu N, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения покоя, $\mu = 0,2$ [4];

N – нормальная сила, действующая противоположно сжатию прижима.

Поскольку вес конструкции ничтожно мал по сравнению с усилием сжатия, им можно пренебречь, $N = P$. Вводимые значения P и $F_{тр}$ приведены в таблице.

Принимаемые значения P и $F_{тр}$

Внешние нагрузки, Н	Значения					
P	600	1200	1800	2400	3000	5000
$F_{тр}$	120	240	360	480	600	1000

Сталь 30ХГСА является типичным представителем мартенситно-бейнитного класса, в котором протекает превращение аустенита в мартенсит и его составные структуры после сварки [5]. В свою очередь, влияние фазовых (структурных) превращений на остаточные напряжения и деформации при сварке настолько значительно, что их оценка без учета структурных превращений приводит к большим ошибкам. Это влияние обусловлено изменением объема и свойств метал-

ла при превращении. Мартенситное превращение сопровождается увеличением объема металла примерно на 3 % и существенно изменяет кинетику деформаций и напряжений [6]. Получаем, что НДС пластин следует изучать совместно с полученной структурой после сварки. А это приведет к повышению сложности анализа влияния жесткости прижима. Поэтому было принято решение о выполнении расчета, где для рассматриваемого материала в программе *SYSWELD* использована кинетическая диаграмма непрерывного охлаждения, но при анализе НДС конечная структура не рассматривается, она привязана к погонной энергии, от которой зависит соотношение структур в пластине.

На основании проделанной работы осуществлена экспериментальная проверка влияния жесткости прижима на НДС пластин при погонной энергии сварки 500 Дж/мм. Сварка выполнена на следующих режимах: $I_{св} = 120$ А, $U_{д} = 11,9$ В, $V_{св} = 2$ мм/с. Для обеспечения равных условий и постоянства всех параметров для 3 образцов сварка проведена с помощью сварочной колонны. Это позволило исключить вероятность случайной ошибки, связанной с человеческим фактором, так как из опыта были убраны навыки сварщика. Режим выбран максимально совпадающий с серией опытов, где погонная энергия равна 500 Дж/мм. Сваривались 3 образца (6 пластин) из высокопрочной стали 30ХГСА толщиной 3 мм. Проверены 3 случая: сварка в свободном состоянии, с изменяющейся жесткостью прижима и в сварочной оснастке, обеспечивающей жесткое закрепление пластин во время сварки. Высокопрочные стали чувствительны к скорости охлаждения, даже при незначительном ее изменении структура стали будет совсем иной. Дальнейшее изучение таких пластин недопустимо. Для обеспечения равных условий для всех образцов и снижения вероятности получения разных структур во время эксперимента под пластины и прижимы было уложено асбестовое полотно.

Грузы в 20 кг, или приблизительно 200 Н, установленные на каждой пластине, симитировали прижим, обеспечивающий постоянство давления на деталь. Для примерной оценки



уровня остаточных напряжений выбраны испытания на статический изгиб и растяжение согласно ГОСТ 6996–66. На основании результатов испытаний можно судить о пластичности и прочности шва и ЗТВ.

Результаты

По итогам решения термомеханической задачи были определены максимальные напряжения и деформации в зависимости от заданного усилия, приведенные на рис. 4. При анализе данных выявлено, что существует такое критическое значение усилия $P_{кр}$, при котором область максимальных деформаций меняет свою локализацию. По графикам на рис. 4 видно, что наименьшие деформации наблюдаются при усилии 600 Н, остаточные деформации снизились на 45 % по сравнению со случаем

сварки в свободном состоянии, а напряжения повысились всего на 3 %.

Механические испытания показали, что при сварке в свободном состоянии прочность и пластичность сварного соединения увеличены по сравнению с жестким закреплением. Предположительно это связано с благоприятным условием кристаллизации металла шва. Прочность сварного соединения на растяжение с применением прижима увеличена на 67 %, угол изгиба – на 20 % по сравнению с жестким закреплением.

Рентгенографический контроль показал отсутствие трещин в сварных соединениях, т. е. уровень напряжений не достиг предела прочности ни в одном случае. Деформации при сварке в свободном состоянии составили

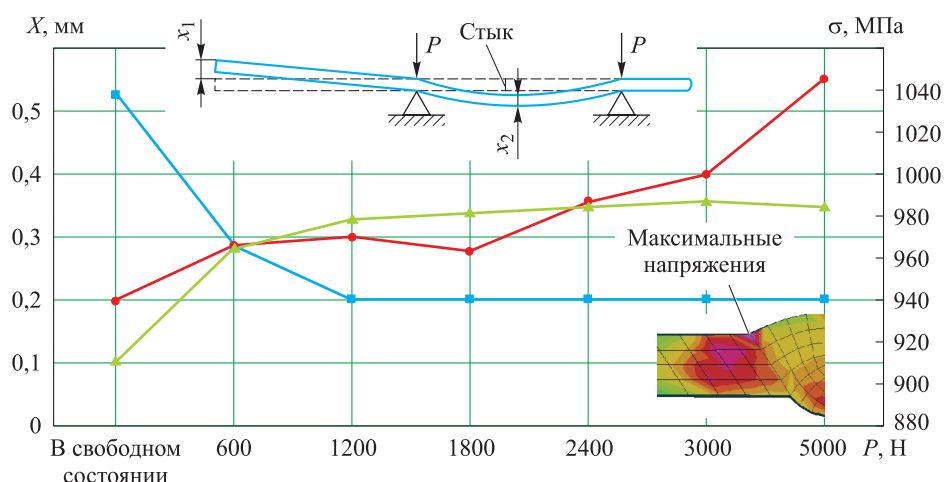


Рис. 4. Изменение максимальных остаточных напряжений и деформаций в зависимости от P :

—■— деформации X_1 ; —▲— деформации X_2 ; —●— напряжения

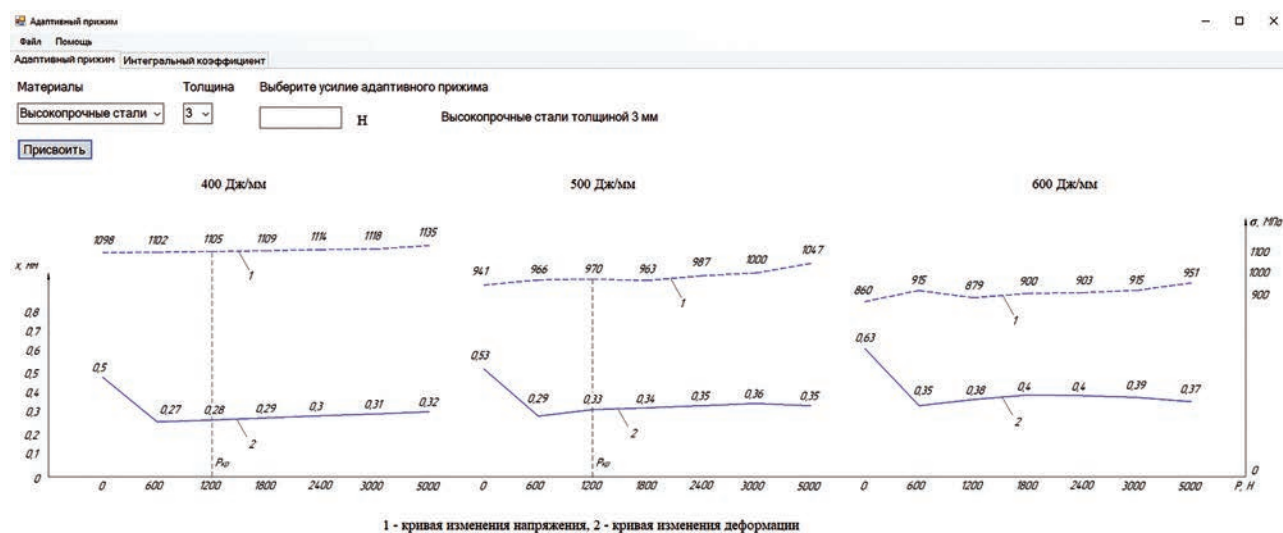
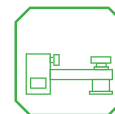


Рис. 5. Графическая визуализация программного модуля



0,55 мм, с применением прижима – 0,45 мм, при жестком закреплении – 0,4 мм. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 11 %.

Полученные результаты расширили библиотеку программного модуля, графическая составляющая приведена на рис. 5, в котором реализована методика выбора усилия прижима от количества погонной энергии и толщины свариваемых деталей. На данный момент библиотека модуля включает в себя результаты по таким распространенным материалам, как высокопрочные стали, алюминиевые и титановые сплавы толщинами 1, 2 и 3 мм. Программное обеспечение позволяет выбрать усилие и создает модель прижима, понимаемую САЕ-платформой. Модуль будет интегрирован в программный комплекс *ProWeld*.

Практическое применение результатов исследования

На основании проделанной работы предложено оснащение прижимами сварочных приспособлений с изменяемой жесткостью согласно рис. 6.

Прижимы с изменяемой жесткостью в сварочной оснастке обеспечивают согласование по обратным связям упругости прижимов и уровня напряжений в сварном соединении в интервале значений, близких пределу прочности. Это дает возможность уменьшить воздействие на свариваемую деталь во время сварки, что эффективно снижает уровень деформации и вероятность образования горячих трещин. Имеется в виду, что, если деталь посредством теплового расширения начинает противодействовать прижиму с усилием большим заданного, прижим обеспечивает некоторый ход для деформации изделия. Это позволит релаксировать напряжения в сварных соединениях и в околошовной зоне, а также ограничить деформации детали во время сварки. Напри-

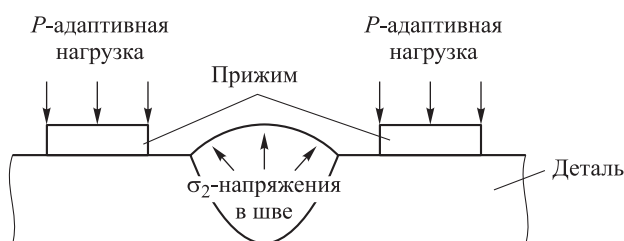


Рис. 6. Адаптивный прижим

мер, с помощью установки обратного клапана в пневматическом прижиме можно снизить давление воздуха в гильзе, уменьшая усилие на деталь при сварке. Деталь деформируется, релаксируя остаточные напряжения. А при исчезновении упругих деформаций в гильзе пневматического прижима повышается давление, выравниваясь с подающей системой. Такая схема обеспечивает воздействие на деталь с определенной силой, которая не изменяется с течением времени.

Полученные результаты можно применять как при расчете 2 пластин при выполнении стыкового шва, так и при сварке продольного соединения обечайки.

Заключение

Разработана модель деформации тонколистовой конструкции из высокопрочной стали при сварке путем компьютерных расчетов в *SYSWELD*.

Расхождения между расчетами и экспериментальными данными не превысили 11 %.

Экспериментальная проверка влияния адаптивного прижима на НДС пластин показала схожее значение деформации, а отсутствие трещин на рентгеновских снимках указывает на то, что остаточные напряжения в пластинах ниже предела прочности.

По результатам расчетов выявлено снижение деформации пластин на 45 % при применении прижима с изменяемой жесткостью, кроме того, незначительно увеличились остаточные напряжения, составившие 3 %. Предполагается, что вероятность трещинообразования останется на прежнем уровне.

Согласно полученным данным, можно определить уровень остаточных напряжений и деформации как при сварке стыкового шва пластин, так и при сварке продольного шва обечайки.

Результаты работы расширили библиотеку данных разработанного программного модуля по выбору усилия прижима.

Список литературы

1. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. М.: Высшая школа, 1971. 760 с.
2. Теория сварочных процессов / А. В. Коновалов, В. М. Неровный, Якушин Б. Ф. и др. М.:



Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 752 с.
3. Феклистов С. И. Моделирование остаточных сварочных деформаций и напряжений. М.: ГНЦ ЦНИИТМАШ, 2003. 122 с.
4. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясения. М.: Физматлит, 2013. 352 с.

5. Максимец Н. А. Технология сварки специальных сталей. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 149 с.

6. Гатовский К. М., Кархин В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Л.: ЛОЛКИ, 1980. 330 с.

Поступила 10.12.18

Хайбрахманов Радик Ульфатович – инженер-технолог бюро сварки Публичного акционерного общества «Машиностроительный завод им. М. И. Калинина, г. Екатеринбург», г. Екатеринбург.

Область научных интересов: моделирование процессов сварки, сварка тонколистовых конструкций из высокопрочных сталей.

Коробов Юрий Станиславович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Область научных интересов: моделирование высокотемпературных физико-химических взаимодействий, свариваемость высокопрочных сталей, CAE-анализ сварных соединений.

Ярошевич Данила Леонидович – главный сварщик Публичного акционерного общества «Машиностроительный завод им. М. И. Калинина, г. Екатеринбург», г. Екатеринбург.

Область научных интересов: моделирование процессов сварки, сварка титановых сплавов средних толщин.

Reducing deformations in thin-sheet high-strength steel structures based on CAE-analysis of welded joints

High competition in the field of mechanical engineering requires the manufacture of lightweight thin-sheet structures made of high-strength steels, ensuring the geometry of certain accuracy. It is possible to ensure the given geometry by improving the residual deformation reduction measures. Based on the analysis of clamping rigidity influence on the stress-strain state of an assembly, the deformation reduction has been investigated by means of computer simulation by finite element method. A clamping model was obtained, which makes it possible to regulate the level of residual stresses and deformations confirmed experimentally.

Keywords: welding process simulation, stress-strain state, high-strength steels, welding fixture, finite element method.

Khaybrakhmanov Radik Ulfatovich – Welding Bureau Process Engineer, Public Joint-Stock Company “Kalinin machinery plant, Yekaterinburg”, Ekaterinburg.

Science research interests: welding process simulation, welding of thin-sheet high-strength steel structures.

Korobov Yuriy Stanislavovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin”, Ekaterinburg.

Science research interests: simulation of high-temperature physicochemical interactions, weldability of high-strength steels, CAE analysis of welded joints.

Yaroshevich Danila Leonidovich – Chief Welder, Public Joint-Stock Company “Kalinin machinery plant, Yekaterinburg”, Ekaterinburg.

Science research interests: welding process simulation, welding of medium-thickness titanium alloys.