УДК 621.791.048:669.14.018.41

Е.И.ПРЯХИН, *д-р техн. наук, профессор, mthi@spmi.ru*
Д.М.ШАРАПОВА, *аспирантка, young_one@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

E.I.PRYAKHIN, *Dr. in eng. sc., professor, mthi@spmi.ru*
D.M.SHARAPOVA, *postgraduate student, young_one@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Имитационное моделирование процессов в зоне термического влияния применительно к сварке низколегированных сталей имеет особую важность. Эта методика использована для исследования структуры металла в зоне термического влияния при сварке под флюсом труб. Установлены причины низкой работы удара в области крупного зерна зоны термического влияния при сварке стали К70.

***Ключевые слова*:** низколегированные стали, сварка, зона термического влияния, структуры, имитационное моделирование.

MODELING SIMULATION OF STRUCTURE IN A HEAT-AFFECTED ZONE OF WELDED JOINT FROM LOW-ALLOYED STEELS

Simulation modeling of processes in the heat-affected zone by welding low-alloyed steels is of particular importance. This technique is used to study the structure of the metal in heat-affected zone by hidden arc welding of pipes. The causes of a low impact strength in the area of large grain of heat-affected zone welding steel K70 are determined.

***Key words*:** low-alloyed steels, welding, heat-affected zone, structure, simulation modeling.

В судостроении при изготовлении корпусных конструкций активно внедряются новые способы сварки, основанные на лазерных технологиях. На ряде верфей (Meyer Werft и Blohm Voss в Германии, Aker Finn Yards в Финляндии, Monfalcone Fincantieri Shipyard в Италии, Kawasaki в Японии и др.) лазерная сварка (ЛС) занимает значительное место среди всех используемых методов сварки. Для средних и толстых листов в зарубежном судостроении начала применяться технологии гибридной сварки (ГС): «высокомощный лазер + дуга» – сварка за один проход; «средне- и маломощный лазер + дуга» – многопроходный вариант. Замена дуговых источников нагрева на лучевые существенно меняет характеристики термических циклов в околошовной зоне, что не может не сказаться на процессах при формировании структур в зоне термического влияния (ЗТВ) [5].

По данным исследований В.Н.Старцева, М.М.Пронина-Валсамаки с коллегами при разработке принципиальной технологии двухсторонней ЛС сталей с пределом текучести 450 МПа толщиной 15 мм ширина ЗТВ у поверхности листов составляет 1,8 мм, а в корне шва – 0,4 мм.

В Германии в Fraunhofer-Institute for Laser Technology с помощью ГС при применении лазера мощностью 20 кВт была достигнута глубина проплавления 15 мм за

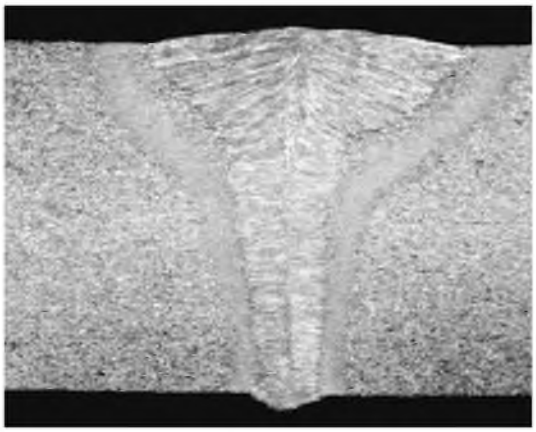


Рис.1. Типичный шов после ГС, полученный за один проход [7]

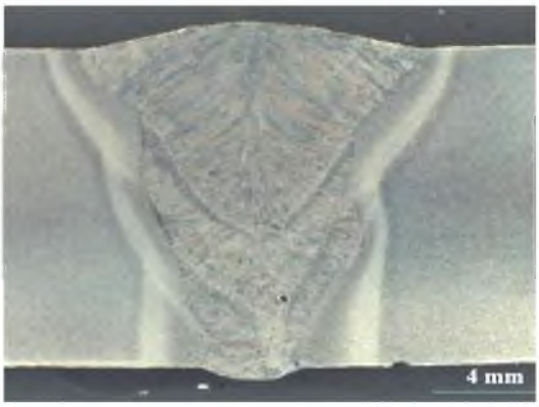


Рис.2. Шов при многопроходной ГС [4]

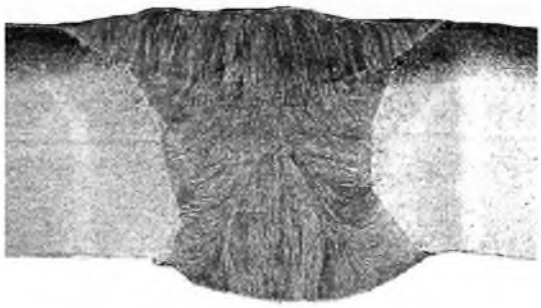


Рис.3. Макрошлиф образца после автоматической сварки под флюсом на подкладке [3]

один проход [7]. Видимая в результате травления ЗТВ в корне шва составила примерно 0,4 мм, а в верхней части соединения максимальные размеры – около 1,5 мм (рис.1).

Дирк Петринг, изучая ГС, лазером мощностью 19,8 кВт за один проход проварил лист высокопрочной стали толщиной 30 мм [6].

Чжао Фучень в своей диссертации приводит шлифы швов (рис.2), полученных многопроходной ГС на стали толщиной 12 мм [4]. При этой технологии наибольшая ширина ЗТВ в корне шва (около 2 мм), а самые узкие ее области наблюдаются в средней части соединения (менее 1 мм).

При дуговой (один электрод) односторонней автоматической сварке под флюсом стали марки 15ХСНД толщиной 14 мм за два прохода (рис.3) размеры ЗТВ находятся в пределах 5-6 мм [3]. Следует отметить, что на судостроительной стали марки10ХСНД при аналогичных режимах и погонных энергиях при сварке под флюсом формируется ЗТВ таких же размеров.

При многодуговой (пять электродов в одну сварочную ванну) сварке под флюсом сталей для магистральных трубопроводов (рис.4) размеры ЗТВ еще больше, чем при сварке одним электродом, по измерениям А.Ю.Иванова достигают 8 мм.

Однако, несмотря на такую значительную величину ЗТВ, определение особенностей формирования структуры в этой области при кратковременных термических воздействиях классическими методами металлографии без привлечения специальных методик весьма затруднительно. Еще большие проблемы в получении достоверных знаний о структурных преобразованиях в металле околошовной зоны металлографическими методами создает применение новых лазерных технологий сварки, так как наблюдается сокращение размеров всех участков ЗТВ на порядок по величине при переходе от дуговой сварки под флюсом к ЛС или ГС.

Современные методы имитационного моделирования позволяют изучить закономерности формирования структур в околошовной области, дать их адекватное описание и установить некоторые особенности при формировании структур, определяющих свойства металла в ЗТВ.

Для изучения структуры в ЗТВ при многодуговой сварке под флюсом сталей для магистральных трубопроводов в работе были успешно использовано имитационное моделирование. Высокую эффективность этой методики при изучении процессов в

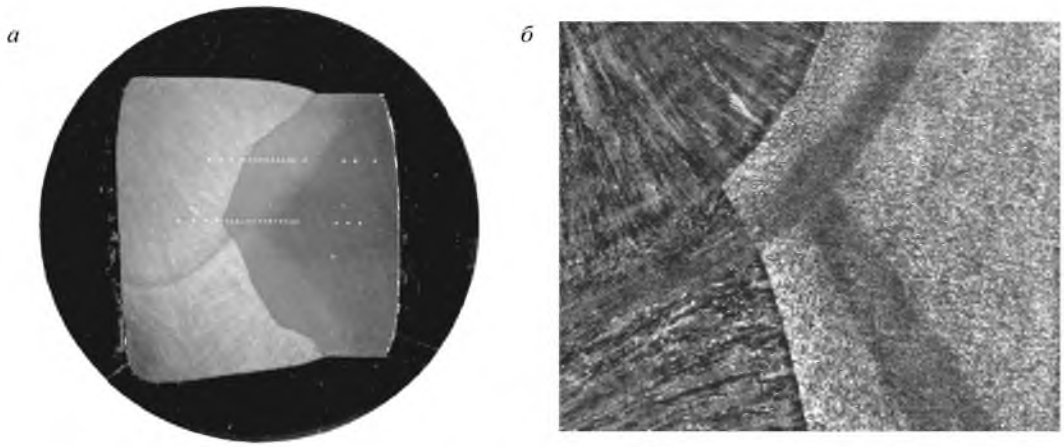


Рис.4. Макрошлиф (*а*) и микрошлиф (*б*) сварного соединения толщиной 27 мм при двухпроходной многодуговой сварке

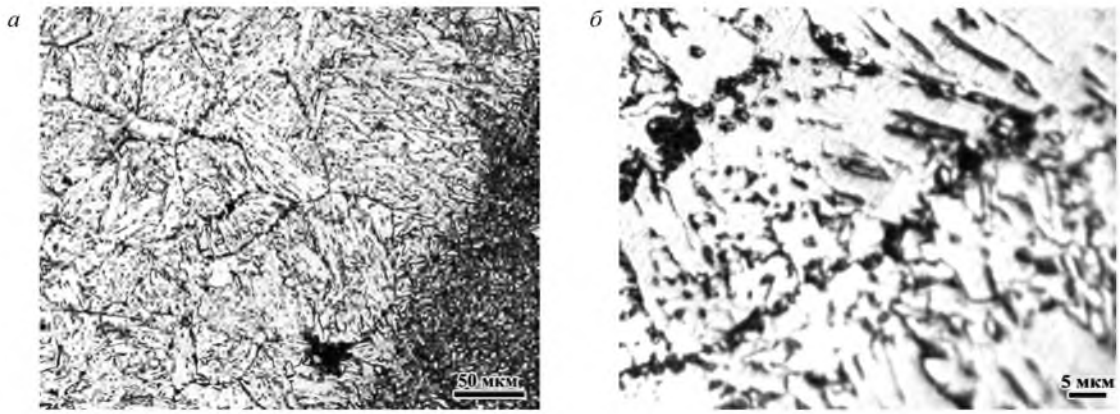


Рис.5. Микроструктура исследованной стали марки К70 в ЗТВ у линии сплавления (*а*), в области крупного зерна (*б*)

металле ЗТВ при сварке демонстрирует следующий пример. Имитация фазовых превращений и структурных изменений на основе изучения термокинетических диаграмм позволила выявить важные закономерности формирования структуры в ЗТВ при сварке под флюсом сталей для магистральных трубопроводов [1, 2].

Исследования проводились на стали марки К70 с пределом текучести 590-690 МПа. Анализ реальных сварных соединений показал (рис.5), что в структуре металла ЗТВ, подвергшегося термическому воздействию при сварке второго прохода, наблюдаются выделения в виде сплошных окантовок зерен, схожие с выделениями карбидов, которые по мере приближения к линии сплавления постепенно исчезают (при однопроходной сварке таких выделений нет).



Рис.6. Микроструктура образца-имитатора после 5-кратного нагрева до 750°С

Для более детального исследования проведен многократный нагрев образца в режиме, при котором наблюдается наиболее сильное образование новой структурной составляющей – нагрев до 750 °С и охлаждение со скоростью 5 °С/с (рис.6).

Образовавшаяся структурная составляющая состоит из чрезвычайно мелких кристаллов игольчатой формы. Во внутренних областях зерна, прилегающих к ней, из-за обеднения легирующими элементами снижена отпускоустойчивость, что привело к исчезновению следов ориентированного превращения. Измерения микротвердости после повторного имитационного нагрева до 750 °С показали повышенные значения твердости у наблюдаемых выделений по границам (400-430 HV) по сравнению с металлом вблизи границ (360-370 HV) и телом зерна (340-350 HV). На реальных сварных соединениях получены аналогичные результаты.

Таким образом, в результате моделирования термических воздействий на металл ЗТВ при двухпроходной многодуговой сварке под флюсом для исследованной стали было установлено, что темнотравящаяся окантовка границ крупных зерен является участками мартенсито-бейнитной структуры, обогащенными углеродом и легирующими элементами. Появление таких участков связано с повторным нагревом в область температур около 750 °С (несколько ниже точки A_{c1}). Понижение скорости охлаждения на первом термическом цикле (что соответствует росту погонной энергии) способствует укрупнению выделений по границам зерен. Каждый последующий нагрев до указанного интервала температур также способствует увеличению доли мартенситной составляющей. Поскольку высокоуглеродистый мартенсит имеет низкую сопротивляемость хрупким разрушениям, то полученные результаты позволили предположить наличие взаимосвязи между снижением работы удара в ЗТВ при многодуговой двухпроходной сварке исследованной стали и образованием мартенситной или мартенсито-бейнитной составляющей по границам зерен.

Выводы

Переход к новым технологиям сварки ведет к значительным изменениям в тепловой обстановке и резкому уменьшении в размерах зоны термического влияния, в связи с чем без имитации на модельных образцах фазовых превращений и структурных изменений весьма проблематично отследить на реальных сварных соединениях закономерности формирования структур в околошовной области, дать их адекватное описание и установить связь со свойствами материала.

Продуктивность такого подхода доказывают полученные результаты на стали марки К70 с помощью моделирования тепловых воздействий в зоне термического влияния при сварке труб под флюсом. Результаты исследований позволяют предположить наличие взаимосвязи между выпадами работы удара и образованиями в структуре мартенситной или мартенсито-бейнитной составляющей в зоне термического влияния при многодуговой двухпроходной сварке исследованной стали К70.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование структуры зоны термического влияния сварного соединения из стали класса прочности Х80 после имитационного моделирования термических воздействий / А.Ю.Иванов, В.В.Орлов, А.А.Круглова, Д.М.Шарапова и др. // Вопросы материаловедения. 2010. № 1(61). С.31-39.

2. Прогнозирование структуры зоны термического влияния трубной стали класса прочности Х80 / А.Ю.Иванов, А.А.Круглова, В.В.Орлов, Д.М.Шарапова и др. // Сборник докладов XV Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций». СПб, 2009. С.243-248.

3. *Сергеев Ю.Г.* Исследование химического состава, твердости и структуры металла сварных соединений стали 15ХСНД применительно к пролетным конструкциям мостов / Ю.Г.Сергеев, Д.М.Шарапова // Вопросы материаловедения. 2009. № 4(60). С.89-100.

4. *Чжао Фучэнь.* Разработка технологий гибридной сварки CO_2-лазер+GMAW бейнитных сталей с ультранизким содержанием углерода: Автореф. дис.… канд. техн. наук. СПб, 2011. 22 с.

5. *Шарапова Д.М.* О необходимости применения современного инструментария при исследовании структур в зоне термического влияния судостроительных сталей // Доклады Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции «Петраньевские чтения. Сварочные материалы – 2012». СПб, 2012. С.202-209.

6. *Dirk Petring.* Enhancement of laser welding capabilities by hybridization or combination of different processes. Proceedings of the 3st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Beijing, China. 2008. P.324-329.

7. Performance and results: Annual report 2000, Fraunhofer-Institute for Laser Technology ILT. P.53. http://www.ilt.fraunhofer.de/eng.

REFERENCES

1. *Ivanov A.Yu., Orlov V.V., Kruglova A.A., Sharapova D.M. and others* and others. Research of structure for heat-ahhected zone of welded joint out of steel of a class of durability X80 after imitating modeling of heat influences // Problems of materials science. 2010, N 1(61). P.31-39.

2. *Ivanov A.Yu., Kruglova A.A., Orlov V.V., Sharapova D.M. and others*. Prediction of the structure of heat affected zone of pipe strength class X80 // Collected reports XV International Scientific and Technical Conference «Problems of Life and the safe operation of materials and structures». Saint Petersburg, 2009. P.243-248.

3. *Sergeiev Yu.G., Sharapova D.M.* Research of chemical compositions, hardness and structure of metal of welded joints from steel 15ХСНД with reference to flying structures of brides // Problems of materials science. 2009. N 4(60). P.89-100.

4. *Zhao Fuchen*. Studies of seam forming at multipass hybrid welding by CO_2-laser+MIC of bainite steels with ultra low content of carbon. Abstract of the thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences. Saint Petersburg, 2011. 22 p.

5. *Sharapova D.M.* About necessity the use of modern tools in the study of structures in the HAZ of shipbuilding steels // Reports of the St. Petersburg International Scientific and Technical Conference. «Petranevskie reading. Welding materials -2012». Saint Petersburg, 2012. P.202-209.

6. *Dirk Petring*. Enhancement of laser welding capabilities by hybridization or combination of different processes. Proceedings of the 3st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Beijing, China. 2008. P.324-329.

7. Performance and results: Annual report 2000. Fraunhofer-Institute for Laser Technology ILT. P.53. http://www.ilt.fraunhofer.de/eng.