

свойств сплава. Так, модуль нормальной упругости повышается с 92,7 ГПа для не модифицированного до 93,3 ГПа для модифицированного, твердость по Мартенсу – с 904 МПа до 956 МПа, по Бринеллю НВ– с 51,0 до 61,2 соответственно. Значение предела прочности составило 214,2 МПа. Это дает основание считать разработанный способ модифицирования перспективным для технологии литых алюминиевых сплавов нового поколения.

Список литературы

1. Совершенствование законодательства с целью повышения эффективности переработки и использования отходов производства и потребления [Электронный ресурс]. URL: <http://council.gov.ru/activity/activities/roundtables/29479/>
2. Проблема промышленных отходов [Электронный ресурс]. URL: <https://msd.com.ua/tehnologiya-teploizolyacii/problema-promyshlennyx-otxodov/>
3. Гуреева М.А. Особенности модифицирования алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si. // Конструирование, расчеты, материалы. – 2015. - № 5 (313). – с. 46.

ПЛАКИРОВАНИЕ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКОЙ

Я.С.СТИЛИНСКИЙ¹, И.А.ЧЕРНОВ², А.К.ПИМОНОВ³

¹Томский политехнический университет, 634050, Томск.

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603950 Нижний Новгород, Россия

³Лаборатория металлографии и спектрального анализа судостроительного комплекса
«Звезда», 692801 г. Большой Камень, Россия
E-mail: yar8530@mail.ru

Биметаллы в общем и плакированные стали используют там, где необходимы совокупные свойства, которых не достичь применением гомогенных материалов. В судостроении таким свойством является высокая прочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью и износостойкостью. На сегодняшний день существует большое разнообразие технологий производства биметаллов, от банальной электродуговой наплавки до применения аддитивных технологий. Но судостроительные листы обшивки имеют колоссальные размеры (5,5 x 14 метров). Поэтому не все технологии подходят для их производства. Можно выделить три подходящих технологии: сварка пакетов горячей прокаткой, электрошлаковая наплавкой и сварка взрывом. Но вышеперечисленные технологии при производстве плакированной стали для судостроения оказываются экономически невыгодными, потому что конечный продукт получается чрезмерно дорогим из-за процессов последующей термообработки и подготовительных процессов. Поэтому, в данной работе, было решено исследовать свойства плакированной стали полученной технологией, исключаяющей удорожающие ее моменты. Для этого была выбрана электродуговая наплавка с последующей холодной прокаткой (ЭДНПХ).

Для изготовления образцов плакированной стали были выбраны коммерчески доступные материалы, такие как сталь 10Г2ФБЮ (в ходе проведения исследований была заменена на судостроительный аналог РСЕ40W) в качестве основного металла и, нержавеющая конструкционная сталь 12Х18Н10Т, в качестве покрывающего (плакирующего) металла.

Конструкционная низкоуглеродистая легированная сталь марки 10Г2ФБЮ отвечает требованиям, предъявляемым Правилами Регистра судоходства [1] к материалам для изготовления корпусов судов. Данная сталь выбрана исходя из возможности сохранять

механические свойства при различных температурах термической обработки из-за наличия легирующих элементов (Cr, V, N и др.), которые повышают мелкозернистость. Кроме того, данная сталь из-за низкого количества углерода (0,12 %) обладает хорошей свариваемостью. Одним из критериев оценки свариваемости является углеродный эквивалент Сэкв рассчитанный в зависимости от содержания в стали легирующих элементов [2] значение которого для особо ответственных и металлоемких конструкций в соответствии с требованиями Регистра должно лежать диапазоне 0,2 – 0,9 %.

Хромоникелетитановая аустенитная сталь марки 12X18H10T широко применяется в судостроении в качестве плакирующего материала в конструкциях судовых систем (опреснительные установки, системы забора и подачи воды и пара, грузоперекачивающие трубопроводы). Данная сталь обладает высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, в том числе стойкостью к питтинговой коррозии в морской воде и развитию межкристаллитной коррозии после воздействия высоких температур в результате сварки. Сталь данной марки остается пластичной при низких температурах, что делает ее пригодной к применению в установках синтеза жидкого кислорода и азота. Таким образом, сталь 12X18H10T является хорошим выбором для использования в качестве плакирующего металла в биметаллическом стальном листе в применении для строительства корпусов судов.

Образцы биметалла 12X18H10T/PCE40W изготовлены на производственных мощностях ССК «Звезда» (судостроительная сталь PCE40W по своему составу и механическим характеристикам является аналогом стали 10Г2ФБЮ и является одним из основных материалов для постройки корпусов на судостроительном комплексе «Звезда»). Плакирующий слой из наносился наплавкой полосок из стали 12X18H10T сечением 6 x 8 мм. на основной слой стали PCE40W. Всего было нанесено 4 слоя (крест на крест), общая толщина плакирующего слоя составила примерно 17 – 20 мм. Таким образом, был изготовлен «сляб» плакированной стали, после прокатки которого на лабораторном стане с усилием на валках 50 кН, на ленточной пиле были нарезаны образцы для проведения испытаний.

Для оценки механических, пластических, коррозионных характеристик и оценки качества сцепления слоев плакированной стали, полученной методом электродуговой наплавки с последующей холодной прокаткой, были проведены испытания на растяжение, ударный изгиб, срез, загиб, ультразвуковой контроль сплошности, испытания на склонность к коррозии и исследование микроструктуры полученных образцов биметалла. Показанные свойства и характеристики биметалла 12X18H10T/PCE40W были сравнены с характеристиками плакированной стали S32750/EN40, полученной сваркой горячей прокаткой пакетов [3] и биметалла 04X20H6Г11M2АФБ/АБ2-2, полученного сваркой взрывом [4].

В результате выполненных исследований установлено следующее:

1) Механические характеристики биметалла 12X18H10T/PCE40W гораздо ниже плакированных сталей изготовленных методом сварки пакетов и сварки взрывом, но полностью удовлетворяют требования Правил постройки морских судов Регистра судоходства РФ. Так же было установлено, что исследованная плакированная сталь показала несколько большие механические характеристики, чем исходная сталь ее основного слоя.

2) Пластические характеристики биметалла удовлетворяют требованиям Правил. Работа удара КСV⁻⁶⁰ составила 166 Дж, что в соответствии с Правилами делает пригодным полученный биметалл для постройки судов, которые будут работать в арктическом регионе.

3) Испытания на срез плакированного слоя продемонстрировали что биметалл, полученный методом ЭДНХП, имеет самое низкое сопротивление срезу, но удовлетворяет требованиям Правил.

4) Испытания на изгиб показали, что на одном из образцов при угле загиба в 107° образовались трещины. Но так как при строительстве судов листы обшивки не подвергаются загибу больше 110° результаты испытаний можно считать удовлетворительными.

6) В результате ультразвукового исследования было обнаружено что прокатанная заготовка для нарезки образцов имеет несплошности на небольшом удалении (до 3 см.) с каждой стороны. Что говорит о необходимости дальнейших экспериментов в подборе оптимального усилия на валках прокатного стана, режиме работы сварочного аппарата, условий наплавки.

7) Показано, что биметалл 12X18H10T/PCЕ40W со стороны плакирующего слоя имеет высокую стойкость к питтинговой коррозии. Так же показано, что нержавеющая сталь плакирующего слоя после удаления с основного слоя со стороны контакта имеет высокую склонность в межкристаллитной коррозии, что может привести судно к преждевременному выходу из строя при расслоении биметалла, если данная плакированная сталь будет применяться при строительстве кораблей.

8) По результатам изучения микроструктуры полученной стали 12X18H10T/PCЕ40W было установлено что: зона сцепления слоев имеет мартенситную структуру и при этом гораздо шире, чем у биметаллов полученных сваркой взрывом и сваркой пакетов, что сказывается на показателях сопротивления срезу; некоторое повышение механико-прочностных характеристик происходит за счет перераспределения в зоне сплавления легирующих элементов разных по химическому составу исходных сталей; склонность к межкристаллитной коррозии аустенитной нержавеющей стали плакирующего слоя объясняется превращением зерен аустенит в меньшие по размеру иглы мартенсита.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что плакированная сталь 12X18H10T/PCЕ40W произведенная методом ЭДНХП, не может быть применена для строительства судов, корпус которых, вследствие трения об лед, подвергается ультра высоким механическим нагрузкам и механическому износу, таких как строящийся на ССК «Звезда» атомный ледокол «Лидер», но данный биметалл вполне может быть использован для строительства судов ледового класса ARC6 (судна не способные самостоятельно проходить во льдах, но способные следовать за ледоколом).

Не смотря на свойства, отвечающие требованиям Правил постройки судов Регистра и относительную, по сравнению с аналогами дешевизну производства стали 12X18H10T/PCЕ40W, технология электродуговой наплавки с дальнейшей холодной прокаткой имеет ряд недостатков:

1) Наплавка полосок плакирующего слоя во всей поверхности основного листа с заданной толщиной требует много времени (по предварительным подсчётам чтобы наплавить стандартный лист обшивки корпуса размером 5,5 x 14 м. плакирующим слоем толщиной 15 мм. потребуется ~ 77 часов).

2) После наплавки плакирующего слоя ему требуется придать заданную шероховатость (в соответствии с Правилами шероховатость должна быть не более 12,5), для чего необходимо использовать, например, крацмашину и дальнейшую механообработку ручным инструментом.

Поэтому совместно со специалистами ССК «Звезда» в рамках дальнейшего проведения НИОКР в целях путей поиска снижения стоимости производства судостроительного плакированного стального листа и на основании результатов исследований в рамках настоящей работы о том, что плакированная сталь без дополнительной термической обработки удовлетворяете Правилам постройки судов будет рассмотрена возможность производства образцов биметалла лазерной наплавкой порошка нержавеющей стали и проведения их испытаний. Данная технология уже довольно широко используется для производства стальных листов, покрытых медью, никелем, титаном и цинком в КНР в промышленном масштабе. При этом установлено что произведенная таким образом

плакированная сталь имеет высокие механико-прочностные показатели, отличное качество сцепления слоев, в некоторых случаях не требует прокатки [5, 6].

Список литературы

1. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II Корпус. Санкт-Петербург 2020 г.
2. Быков А.А. Развитие производства биметаллов / А.А. Быков. - Metallurg. - 2009. - №8. - с. 70-75.
3. Song H., Shin H., Shin Y. Heat-treatment of clad steel plate for application of hull structure //Ocean Engineering. – 2016. – Т. 122. – С. 278 - 287.
4. Харьков О.В., Андрианов В. М. Опыт и перспективы применения биметаллов, полученных сваркой взрывом в судостроении и судоремонте //Ползуновский альманах. – 2017. – №. 1. – С. 91-95.
5. Zhao Z. et al. Microstructural evolutions and mechanical characteristics of Ti/steel clad plates fabricated through cold spray additive //Materials & Design. – 2020. – Т. 185. – С. 108249.
6. Su H. et al. Manufacturing technology and application trends of titanium clad steel plates //Journal of Iron and Steel Research International. – 2015. – Т. 22. – №. 11. – С. 977-982.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг5 ПОСЛЕ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ С ВВЕДЕННЫМ ПОРОШКОМ ВОЛЬФРАМАТА ЦИРКОНИЯ ZrW_2O_8

А.В. СУДАРИКОВ¹, А.В. ЧУМАЕВСКИЙ², Е.О. КНЯЖЕВ², Е.А. КОЛУБАЕВ^{1,2}

¹Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [судариков-97@mail.ru](mailto:sудариков-97@mail.ru)

Существенное влияние на формирование поверхностной структуры при фрикционной перемешивающей обработки [1] оказывают введенные в расплав матрицы различные частицы металлов, карбидов, нитридов и оксидов, образуя там композитные структуры и интерметаллидные соединения [2]. Такие соединения модифицируют материал матрицы, вызывая рост механических, трибологических и эксплуатационных свойств.

Вольфрамат циркония ZrW_2O_8 является перспективным материалом благодаря своему изотропному отрицательному коэффициенту теплового расширения, что вызывает большой интерес в исследовании его влияния на микроструктуру поверхности материалов [3]. Фрикционная перемешивающая обработка образцов из алюминиевого сплава АМг5 с равномерно распределенными дорожками в виде отверстий с уплотненным порошком ZrW_2O_8 проводилась на лабораторной установке в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. Обработка поверхности материала осуществлялась в четыре последовательных проходов инструментом. Изображения микроструктуры, полученные на оптическом микроскопе Olympus LEXT OLS4100, представлены на рисунке 1.