НАПЛАВКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ

Cladding of large components: comparing conventional and new technologies and materials

Ingrid Hauer
HoganasAB, SE-263 83 Höganäs. Sweden
Nicholas Kampanis
Iroon Polytehniou 31 18532 Piraeus
Денис Ощепков
HoganasAB, SE-263 83 Höganäs. Sweden

КРАТКИЙ ОБЗОР

Проанализированы характеристики традиционной технологии восстановления круногабаритных изделий в сравнении прогрессивной технологией. Различные критерии, такие как механические, металлографические, экономические использовались, для получения более полную картину. Традиционная технология восстановления наваркой металлическим электродом в среде инертного газа (GMAW/MIG) является наиболее распространенной в данной области, в то время как наиболее прогрессивной альтернативой является лазерное плакирование. Механические характеристики оценивались по показателям прочности на растяжение, принимая во внимание требования Морского классификационного общества (учреждения,занимающиеся классификацией судов и надзором за ними при постройке и эксплуатации). Экономические аспекты процесса были исследованы, учитывая требуемые инвестиции в основной капитал, рабочую силу, расходные материалы, а также дополнительные операции после восстановления. Материал покрытия, часто используемый в данном применении - аустенитная нержавеющая сталь AISI 316L. При традиционной технологии восстановления используется материал покрытия в виде проволоки, в то время как при лазерной наплавке, используется металлический порошок. Результаты сравнения показывают, что лазерная технология имеет существенные преимущества во всех отношениях. Снижение времени восстановления может быть достигнуто с меньшими затратами на материалы и оплату труда. Одновременно достигаются эквивалентные, если не лучшие механические и антикоррозийные свойства.

ABSTRACT

The performance of conventional cladding techniques, on the coating of large industrial components, is analyzed and compared against a high end technique. A variety of criteria are used such as mechanical, metallographic and economic in order to obtain a more complete picture. The conventional technique under investigation is Gas Metal Arc Welding (GMAW/MIG) being one of the most established in the field, while the high end counterpart is an emerging technique referred to as Laser Cladding. The mechanical performance is judged in regard to tensile testing with marine classification society rules in mind. Furthermore, the economic aspects of the operation are examined considering capital investment, labour, welding consumable as well as post welding operation costs. A cladding material often used in such applications is compared, an austenitic stainless steel AISI 316L. In the case of the conventional technique, the filler material is in wire form while in the case of the laser technique, metal powder is used. Results indicate that the laser technique presents significant advantages in all respects as faster turnaround can be achieved with less material consumed and lower labour cost. While equivalent if not better mechanical and corrosion properties can be realised.

ВВЕДЕНИЕ

Упрочнение поверхности наплавкой (плакированием) широко используется в металлургической промышленности, кораблестоении и нефтехимической промышленности для увеличения жизненного цикла изделий и снижения затрат. Как в случаях производства, так и ремонта, плакирование обеспечивает огромную выгоду за счет разумного использования дорогостоящих материалов и возможности повторного использования изделий. В общем определении термин «плакирование» применяется к большому количеству технологий, в которых тонкий слой покрытия с оптимизированными свойствами накладывается на рабочие поверхности изделий, произведенных из более дешевых материалов. Таким образом, стойкость к воздействию коррозии, эрозии и износа может

быть существенно повышена. Технологии плакирования позволяют придавать рабочие свойства экзотических дорогостоящих материалов изделиям, изготовленным из относительно дешевых низколегированных сталей.

Каждый метод плакирования имеет свои достоинства. Однако, технологии наплавки являются наиболее универсальными, вследствие широкого выбора способов наплавки, в особенности когда требуется создать высоконагруженный слой с максимальной адгезией. Это используется в различных отраслях промышленности, таких как горнодобывающая, строительная, кораблестроительная, нефтехимическая и автомобильная.

В кораблестроительной промышленности типичными применениями технологий плакирования являются наплавка или напыление стержня клапана, ремонт лопастей винта и приводного вала коррозионостойкими материалами. Традиционные технологии покрытий базируются на дуговой наплавке в различных ее формах, таких как наплавка в газовой среде (GMAW/MIG), наплавка под слоем флюса (SAW) и электрошлаковая наплавка (ESW). Данные методы с успехом используются при производстве и ремонте различных изделий. Однако, сравнительно слабая пространственная концентрация энергии часто приводит к различным посторонним эффектам, не позволяющим использовать данные технологии наплавки для критических компонентов. В случаях, когда наплавка является единственным возможным способом, как например ремонт приводных судовых валов, Классификационные общества предъявляют строгие требования к процедурам производства и ремонта, с целью снижения риска аварии.

В данной работе традиционная технология дуговой наплавки в среде инертного газа (GMAW/MIG) и современная технология лазерной наплавки (LC) сравниваются применительно к производству и ремонту судовых приводных валов. Рассмотрены как технические так и экономические вопросы с целью выявления реального потенциала применения технологии лазерной наплавки в производстве.

GMAW/MIG – устоявшаяся технология для различных применений. Она успешно используется промышленностью в течение многих лет и ее безупречный уровень индустриализации и развития дает основания полагать, что она также будет использоваться в течение многих следующих лет. Лазерная наплавка, с другой стороны, относительно новая технология, многообещающая с токи зрения повышения качества покрытия и снижения затрат. В более ранней статье (1) пример ремнота крупногабаритного приводного вала уже был рассмотрен. В данной работе, рассматривается применение лазерной наплавки как с технической, так и экономической точек зрения. Другие публикации также показывают достоинства лазерной наплавки применительно к восстановлению подобных деталей, и основной упор делается на стандартизацию технологии для ремонта приводных судовых валов (2). Следует признать, что хотя технология лазерной наплавки была доступна уже в течение нескольких лет, её принятие промышленностью было относительно медленным, особенно в кораблестроительном секторе (3) по различным причинам. Основной причиной явилась высокая инвестиционная стоимость оборудования, а также достаточно низкий уровень индустриализации технологии, низкая производительность и ограниченное количество поставщиков систем «под ключ». С приходом на рынок высокомощных диодных лазеров порядка 10 кВт при быстро снижающихся ценах на оборудование и появлением гибридных индукционных технологий (4) интерес промышленности к лазерному плакированию существенно возрастает. Для того, чтобы подчеркнуть достоинства и недостатки рассматриваемых технологий наплавки приведем краткое их описание.

1. ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ

При электродуговой наплавке в среде инертного газа (GMAW/MIG) дуга устанавливающаяся между непрерывно подающимся проволочным электродом и наплавляемой деталью обеспечивает подвод тепла, необходимого для расплавления наплавляемого металла и поверхности детали. Защитный газ, подающийся коаксиально с наплавочной проволокой защищает ванну расплава и дугу от атмосферы. Хотя данная технология часто используется вручную, в течение последних десятилетий она интенсивно развивалась и на сегодняшний день часто интегрирована с роботами. В работе (5) рассмотрена полностью автоматизированная и роботизированная установка, позволяющая осуществлять непрерывную наплавку изделий без участия человека, что позволило существенно повысить производительность процесса. Более того, комбинация польсирующих токов и прерывистой подачи проволоки позволяет минимизировать тепловвод и повысить производительность. Наконец, при данном способе может быть использован широкий спектр материалов, таких как алюминий, сталь, кобальт и никелевые сплавы.

Лазерная наплавка (LC) с другой стороны использует высокоэнергетичный лазерный луч в качестве источника тепла для расплавления и материала покрытия и поверхности покрываемой детали. Так как лазерный луч это электромагнитное излучение, вся энергия может быть концентрирована в

небольшом пятне, исключая её рассеяние за счет конвекции горячих газов и электромагнитных сил. В результате тепловвод в деталь минимизируется и достигается более высокое качество и эффективность процесса наплавки. Наплавочный материал может вводиться в различных формах, при этом, наиболее распространено применение порошковых материалов. При создании ванны расплава, оплавляется только тонкая пленка базового материала и наплавляемый порошок, что позволяет формировать наплавленный слой, прочно связанный с основным металлом при низкой степени разбавления покрытия основой.

Высокая интенсивность лазерного луча и низкий тепловвод позволяют минимизировать поводки, остаточные напряжения и деградацию основного материала. Более того, высокие скорости охлаждения, обеспечивающие формирование мелкозернистой структуры и малые зоны термического влияния приводят к повышению механических свойств.

Данные достонства позволяют проводить наплавку критических деталей, которые не могли быть отремонтированы в прошлом другими методами. Это открывает новые возможности для улучшения свойств и снижения затрат через восстановление изделий, которые ранее необходимо было бы заменять новыми. Более того, безупречный контроль толщины покрытия и низкая шероховатость поверхности позволяет минимизировать последующую механическую обработку и таким образом снизить стоимость ремонта.

Сравнение двух технологий приведено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики электродуговой и лазерной наплавки

Технология	GMAW/MIG	LC
Тепловвод	~ 5Дж/мм	~ 5Дж/мм
Произвоительность	5-8 кг/ч	4-10 кг/ч в зависимости от мощности лазера
Разбавление	20-30%	<5%
Размер дендритов	Грубый	Мелкий
Форма наплавляемого материала	Проволока	Порошок
Уровень развития - индустриализации	Очень высокий	Средний
Геометрический контроль наплавленной дорожки	Хорощий (+/- 0,5-1мм)	Отличный (+/- 0,1мм)
Припуск под мех. обработку	Большой (3-4мм)	Малый (1-2мм)
Разбрызгивание	Больше	Меньше
Инвестиционная стоимость	~100-200 тыс ЕВРО (включяя робот)	~300-500 тыс ЕВРО (в зависимости от источника лазера)
Эксплуатационные расходы	Средние (проволока дороже порошка)	Низкие (более низкие потери материала при мех. обработке, более тонкий слой благодаря маньшему разбавлению)

2. ЦЕЛИ

Цели данной работы понять достоинства и недостатки лазерной наплавки применительно к крупногабаритным изделиям, таким как приводные валы морских судов и реализация потенциала технологии в реальном применении. Исследования механических свойств и металлографии были проведены с тем, чтобы продемонстрировать технические преимущества метода. Наконец, такие экономические аспекты как инвестиционная стоимость, затраты на оплату труда и другие операционные расходы также были рассмотрены с целью сравнения финансовой состоятельности двух процессов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Технологии лазерной (LC) и электродуговой (GMAW/MIG) наплавки использовались для производства образцов покрытия толщиной 20мм на подложку из низколегированной стали размерами 100 х 80мм и толщиной 25мм. Для лазерной наплавки использовался 4 кВт прямой диодный лазер с длиной волны 808нм совместно с 6-осевым роботом компании ABB. Электродуговая наплавка проводилась вручную опытным сертифицированным сварщиком.

Параметры обоих процессов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры наплавки

Технология	GMAW/MIG	LC
Тепловвод	180А/23В	4кВт
Расход материала	4кг/ч	4кг/ч
Защитный газ	ENISO 14175 –Z-Ar+NO-0,03 10 л/мин	Ar 10л/мин
Транспортировочный газ	-	Ar 3л/мин
Наплавляемый материал	316L проволока ∅0,8мм	316L порошок

Разбавление основой измерялось в обоих случаях после наплавки первого слоя при помощи анализатора XRF Niton XL2. Образцы для испытания на растяжение вырезали из наплавленного слоя в соответствии со стандартом ISO 2560-1973, как показано на рис. 1.

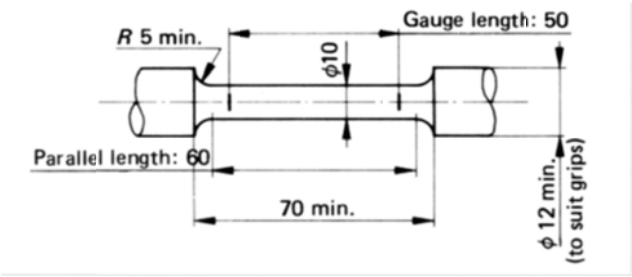


Рис. 1 Образец для испытания на растяжение

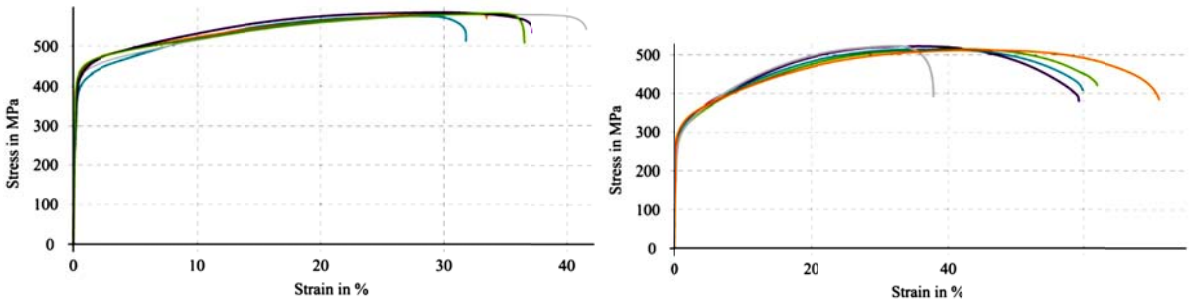
Испытания на растяжение проводили в соответствии с ISO 2560-1973.

Образцы для исследования микроструктуры варезали из наплавленных образцов перпендикулярно направлению наплавки. Образцы заплавляли в специальный полимерный материал с тем, чтобы избежать «закатывания» кромок шлифа при его приготовлении. Шлифовка и полировка образцов осуществлялась в последовательности: 9мкм; 3мкм; полировка 1мкм, DP, суспензия. Для травления образцов применялся состав glycerigia, состоящий из 45мл глицерина, 15 мл HNO3 и 30мл HCl.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физические свойства материала приведены в таблице 2 и рис. 2 а-б.

316L	Предел прочности на растяжение, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость, HV_{300}
LC	582	418	36	257
GMAW/MIG	518	264	57	226

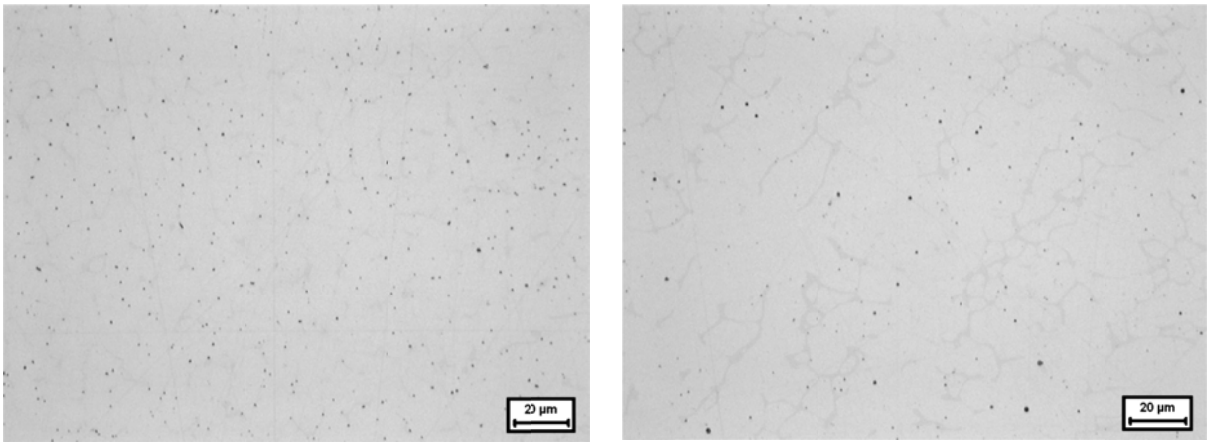


а б

Рисунок 2. Кривые растяжения наплавленного материала 316L, а – после лазерной наплавки (LC); б – после электродуговой наплавки (GMAW/MIG)

Испытания на растяжение показали более высоке уровни предела прочности и текучести для материала после лазерной наплавки. Электродуговая наплавка напротив, обеспечила повышенное относительное удлинение. Результаты замеров тверости показали значения 257 HV_{300} для лазерной наплавки и 226 HV_{300} для электродуговой.

Микроструктура наплавленного слоя после двух процессов нанесения показана на рисунке 3.



а Б

Рисунок 3. Микроструктура наплавленных слоев, не травлено. а – после лазерной наплавки (LC); б – после электродуговой наплавки (GMAW/MIG)

Нетравленная микроструктура показывает отсутствие пор и трещин в покрытиях, полученных по обоим технологиям. Более мелкозернистая структура с более дисперсными оксидами получена после лазерной наплавки (рис. 3а) по сравнению с электродуговой (рис. 3б). Несколько большее количество оксидов, сформировавшихся после лазерной наплавки объясняется использованием разных защитных газов. Смесь газов ENISO 14175 –Z-Ar+NO-0,03, применяемая при дуговой наплавке является восстановительной, что снижает количество оксидов в сравнении с чистым аргоном, применяемым при лазерном плакировании. Более того, медленное охлаждение после электродуговой наплавки приводит к укрупнению формирующихся оксидов.

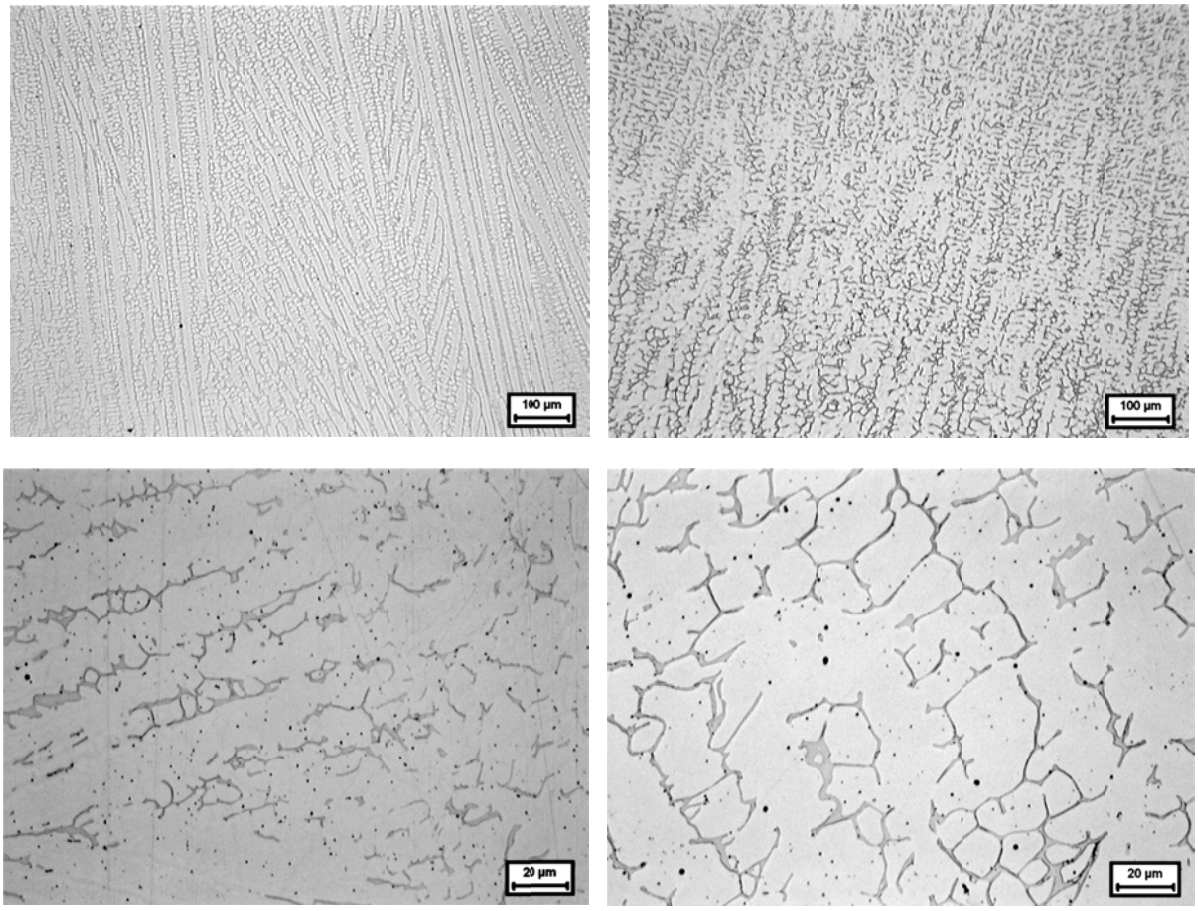
Большее колчество оксидов, сформировавшихся в лазерном покрытии в комбинации с мелкозернистой структурой объясняет более высокую твердость и несколько более низкие показатели по относительному удлинению.

Образцы травили составом glycerigia. Фотографии микроструктуры приведены на рис 4а и б при увеличениях 10х и 50х.

Ценность металлографических исследований как интрумента для прогнозирования физических свойств хорошо известна. Результаты, представленные в данном исследовании подтверждают общепринятые факты. Фотографии травленной микроструктуры показывают более крупнозернискую структуру с крупными дендритами при электродуговой наплавке, что частично объясняет более низкие показатели прочностных свойств, таблица 2. Микроструктура обоих образцов состоит из аустенита (светлые области) рис. 4 и более темных областей дельта феррита. Ферритные области в образце, полученном электродуговой наплавкой распределены менее равномерно в сравнении с лазерным покрытием.

Предел прочности был на 11% выше в покрытии, полученном лазерной наплавкой в сравнении с электродуговой, тогда как предел текучести на 37% выше. Разница в пределах текучести существенно выше, чем в пределах прочности для образцов, полученных по двум технологиям. Принято считать, что такие дефекты как оксиды могут играть в этом ключевую роль. Частичным объяснением формирования большего количества осидов является использование нейтрального защитного газа. Формирование мелкодисперсных оксидов приводит к дисперсионному твердению материала покрытия. Размер

формирующегося зерна при лазерной наплавке значительно меньше, что также вносит свой вклад в более высокий показатель предела текучести.



а б

Рисунок 4. . Микроструктура наплавленных слоев, травлено. а – после лазерной наплавки (LC); б – после электродуговой наплавки (GMAW/MIG).

Материал 316L после лазерной наплавки показывает отличную стойкость против питтинговой коррозии, что было показано в предыдущей публикации. Более мелкозернистая микроструктура обладает более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с крупнозернистой (6), (7). Данный факт требует дальнейших исследований для более полного понимания процесса.

Разбавление наплавленного материала основой в обоих случаях измерялось в первом слое наплавки. Разультаты измерений следующие:

- 2% для образца после лазерной наплавки
- 21% для образца после электродуговой наплавки (GMAW/MIG)

Сравнение между покрытиями, полученными лазерной и электродуговой наплавкой на поверхность низкоуглеродистой стали показано на рисунке 5. Требование по минимальной поверхностной твердости покрытия приводного вала - 220 HV_{300}. Данный показатель был достигнут после наплавки слоя 1 мм лазером, либо 8 мм электродуговым способом. Как показано в таблице 4, при электродуговом способе требуется наложить в 7-8 раз больше материала в сравнении с вариантом лазерной наплавки для получения необходимой поверхностной твердости.

Таблица 4. Сравнение способов наплавки

	Лазер - порошок	MIG-проволока
Твердость, HV_{300}	257	226
Толщина покрытия	1мм	8мм
Необходимый объем материала для получения требуемой твердости	13%	100%

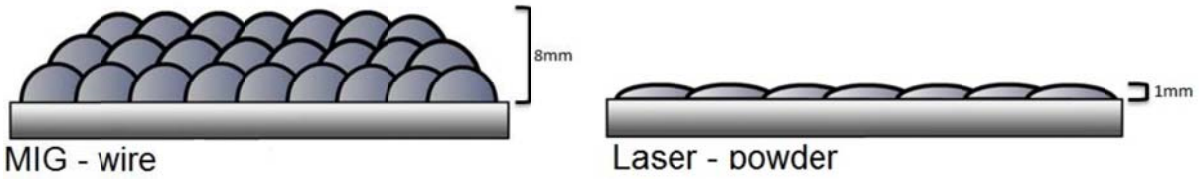


Рисунок 5. Сравнение формы наплавляемой дорожки

Шероховатость поверхности покрытия, полученного методом лазерной наплавки значительно ниже, чем электродуговой. Шероховатость зависит от формы наплавляемого валика, и величины перекрытия мжду ними. Это позволяет снизить объем механической обработки, необходимой для получения финальных размеров и точности применяя лазерную наплавку.

5. СТОИМОСТЬ

Как показано выше, анализ металлографии и механических свойств показывает превосходство покрытия, полученного лазерным плакированием над электродуговым (GMAW/MIG) с технической точки зрения. Далее, попытаемся привести сравнение экономических показателей процесса применительно к конкретному случаю. Характеристики приводного вала морского парома, который необходимо наплавить приведены в таблице 5. Наплавка необходима для создания коррозионностойкого слоя, на всей части вала, работающей в контакте с морской водой. Для упрощения расчетов, рассмотрим только стоимость материала и трудовых ресурсов для процесса наплавки и последующей обработки. Исключим операции, на которые не оказывает непосредственного воздействия выбор технологии наплавки.

Как показано выше, только 1 слой покрытия необходим при лазерной наплавке для того, чтобы достичь низкой степени разбавления покрытия основой и тем самым обеспечить необходимый уровень твердости и коррозионной стойкости. Электродуговой способ, напротив требует нанесения 8 слоев для достижения необходимого результата. Некоторые высокоспециализированные установки дуговой наплавки позволяют достичь необходимой твердости при нанесении 4 слоев. Более того, вследствие более высокой неровности поверхности и возможных поводок вследствие высокого теплового воздействия, большие припуски на механическую обработку требуются при электродуговом способе наплавки. В результате необходимое количество наплавочного материала при электродуговом способе существенно выше.

Следует отметить, что для данного конкретного случая цена порошка и минимальная цена наплавочной проволоки примерно одинаковы, таблица 6. Цена проволоки 316L находится в пределах 16-22 ЕВРО/кг в зависимости от диаметра. Для более экзотических материалов, как например Inconel ® 625 цена проволоки может быть в 3-5раз выше цены порошка, что создает большую разницу в операционных расходах двух сравниваемых способов.

6. ПРИМЕР НАПЛАВКИ ПРИВОДНОГО ВАЛА

Приводной вал длиной 8000мм и диаметром 500мм необходимо защитить от коррозии, см табл. 5. При использовании лазерной наплавки слой покрытия должен составлять 2,5мм после механической обработки. Необходимый припуск на механическую обработку составляет 1мм. Таким образом,

потребуется 390 кг материала для данного вала, учитывая эффективность использования материала, составляющую 90%[1].

В случае дуговой наплавки GMAW/MIG при использовании высокоспециализированной системы потребуется слой 4мм и 2 мм припуска на мех. обработку. Таким образом, необходимо будет 600кг материала или больше на 54% в сравнении с лазерной технологией.

Предполагая производительность обоих процессов одинаковой и равной 5 кг/час, необходимое время наплавки составит 78 часов для лазерного и 120 часов для электродугового способа.

Для мех. обработки лазерного покрытия понадобится 2 прохода: черновой и финишный, в результате получаем 34,5 часа машинного времени. Машинное время для обработки приведено в таблице 6. С другой стороны, для обработки электродугового покрытия понадобится 2 черновых прохода и один финишный, что дает полное машинное время 48,1 часа, см табл. 7.

Складывая стоимости трудовых ресурсов и материалов получаем стоимость эксплуатации 11049 ЕВРО для лазерной наплавки и 19152ЕВРО для электродуговой, что на 52% выше. В данном расчете не учитывались затраты на возможную правку вала после электродуговой наплавки. В случае GMAW/MIG – процеса высока вероятность поводок вследствие высоких остаточных напряжений, тогда как данный феномен значительно менее вероятен при лазерной наплавке. Таким образом, разница в себестоимости может быть значительно выше в реальности.

Дополнительно, производство или ремонт такого изделия могут быть проведены с экономией времени в 30%, что является значительным выигрышем для покупателя в плане снижения времени простоя.

Очевидно, что высокопроизводительная установка лазерной наплавки значительно более экономически эффективна в сравнении с традиционным методом для наплавки такого рода изделий, даже учитывая более высокую инвестиционную стоимость.

Стоимость полностью автоматизированной системы для лазерной наплавки с лазером мощностью 6 кВт составляет порядка 400 000 ЕВРО, таблица 1. Эквивалентная MIG установка – порядка 200 000 ЕВРО.

Рассмотрим приблизительные сроки окупаемости установки, предполагая ремонт 12 подобных валов в год. Данный объем соответствует почти 50% загрузки лазерной установки, либо 69% загрузки MIG системы при односменном режиме работы. Применение лазерной системы обеспечит получение прибыли на 97 236 ЕВРО большей ежегодно в сравнении с применением MIG системы, что соответствует сроку окупаемости 2 года. Более того, так как лазерная система будет менее загружена, это позволит производить больше дополнительных работ, что позволит далее снизить срок окупаемости.

Таблица 5. Характеристики наплавляемого изделия

	LC	MIG
Диаметр готового изделия	500мм	500мм
Длина наплавки	8м	8м
Толщина наплавленного слоя	2,5мм	4мм
Припуск на МО	1мм на сторону	2мм на сторону
Производительность наплавки	5кг/час	5кг/час
Эффективность использования материала	90%	-

Таблица 6. Параметры механической обработки

Параметр	Величина
Скорость резания	40м/с
Глубина резания	0,5-1мм
Подача при черновой обработке	0,4мм/об
Обороты шпинделя при черновой обработке	24 об/мин
Подача при чистовой обработке	0,2мм/об
Обороты шпинделя при чистовой обработке	32 об/мин
Время черновой обработки	13,67 час/проход
Время чистовой обработки	20,8 час/проход

[1] под эффективностью использования материала понимается отношение массы наплавленного металла к массе израсходованного порошка

Таблица 7. Сравнение экономических показателей процессов наплавки

	LC	MIG
Наплавляемый материал	AISI 316L	AISI 316L
Стоимость материала	12 EUR/кг	16 EUR/кг
Расход защитного газа	20 л/мин	20 л/мин
Стоимость защитного газа	4 EUR/м^3	4 EUR/м^3
Стоимость нормо часа	50 EUR/ч	50 EUR/ч
Количество наплавляемого материала	390кг	600кг
Трудоемкость наплавки	78 час	120 час
Трудоемкость мех. обработки	34,1 час	48,1 час
Общая трудоемкость	112,5 час	168,1 час
Затраты на наплавляемый материал	4680 EUR	9600 EUR
Затраты на защитный газ	745 EUR	1145 EUR
Затраты на оплату труда наплавки	3900 EUR	6000 EUR
Затраты на оплату труда мех обработки	1724 EUR	2407 EUR
Общая себестоимость процесса	11049 EUR	19152 EUR

ВЫВОДЫ

В работе приведено прямое сравнение широко распространенного способа электродуговой наплавки в среде защитного газа GMAW/MIG и развивающейся новой технологии лазерной наплавки с точки зрения технических и экономических аспектов. Механические испытания и металлографические исследования проведены для проверки технических преимуществ метода лазерной наплавки. Дополнительно было проведено сравнение двух технологий с экономической точки зрения. Приведены параметры операционных расходов, расходов на оплату труда, тредоемкость и расходы материала для двух рассматриваемых процессов. В итоге, приведен примерный расчет срока окупаемости инвестиций в оборудование для лазерной наплавки.

Результаты показывают, что покрытие, полученное методом лазерной наплавки показало более высокие механические свойства. Анализ затрат показал, что лазерная наплавка требует значительно меньших операционных расходов в сравнении с эксплуатацией электродуговой MIG системы. Наиболее важные результаты кратко обобщены ниже:

- Более высокие показатели прочности на растяжение были получены при испытании материала после лазерной наплавки в сравнении с электродуговой, 582 МПа против 518МПа.
- Предел текучести материала покрытия, полученного методом лазерной наплавки значительно превысил аналогичный показатель для GMAW/MIG-покрытия, 418МПа против 264МПа. Данная разница обусловлена более мелкозернистой микроструктурой покрытия, полученной за счет высоких скоростей охлаждения при лазерной наплавке.
- Относительное удлинение материала покрытия при лазерном плакировании оказалось ниже чем электродугового GMAW/MIG, 36% против 57%, Данный факт прежде всего связан с формированием большего количества мелкодисперсных оксидов при лазерном плакировании за счет применения менее восстанавливающего защитного газа. Более высокая скорость охлаждения также существенный вактор, влияющий на пластичность материала покрытия.
- Значительно меньшее разбавление материала покрытия основой получено при лазерной наплавке, 2% против 21%. Это позволяет значительно снизить расход материала для получения заданной твердости и коррозионной стойкости поверхности. Лучшие показатели шероховатости поверхности при лазерной наплавке позволяют снизить количество мех обработки.
- На 54% больше материала необходимо затратить при наплавке вала электродуговым методом в сравнении с лазерным для достижение той же степени разбавления основой на поверхности.
- Трудоемкость процесса наплавки электродуговым методом была на 30% выше нежели при лазерной наплавке.

- Операционные издержки на наплавку данного вала электродуговым способом оказались на 73% выше, чем на лазерную наплавку.
- Даже рассматривая более высокую инвестиционную стоимость оборудования для лазерной наплавки, лазерная сстема оказывается более прибыльной, чем электодуговая. В течение 2 лет разница в инвестициях должна окупиться. Различие в инвестиционной стоимости покрывается за счет более высокой прибыли и производительности процесса лазерной наплавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Propeller Shaft Repair for a Large Ferry with the Aid of Laser Cladding.* **Kampanis, Nicholas και Hauer, Ingrid.** Surabaya, Indonesia: s.n., 2010. ICSOT Conference. (Roussakis SA, Hellas, Höganäs AB, Sweden).
2. **Palmer, Todd A.** *Implementation of Laser Cladding for Virginia Class Submarine Main Propulsion Shaft Repair.* Applied Research Laboratory, Pensilvania State University.
3. **Merchant, Vivian.** The slow industrial acceptance of Laser Cladding. *Industrial Laser Solutions For Manufacturing.* 2002, Vol. 17, 6.
4. *Inovations in Laser Cladding and Direct Metal Deposition.* **Bruckner, Frank, Nowotny, Steffen and Leyens, Christoph.** San Fransisco California: SPIE, 2012. Proc. of SPIE Vol. 8239, 823904.
5. **Delacourt, Christophe.** Warstila: hour less unmanned production without any welding interruptions. *www.valkwelding.com.* Valk Welding, 2006.
6. *Influence of cold work and grain size on the pitting corrosion resistance of ferritic stainless steel.* **Li, Zhen,** Seattle : Minerals, Metals and Materials Society/AIME, 2010. TMS 2010 Annual Meeting and Exhibition.
7. *Influence of austenitic grain size on the stress corrosion cracking resistance of steel applied in sour service environments.* **Carvalho, Felipe Leal,** Brasil: 61st Annual ABM International Congress, 2006.