

УДК 621.791.927

Лещинский Л. К., Матвиенко В. Н.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИЙ С ПЛАСТИЧНЫМ ПОДСЛОЕМ

Применение подслоя из феррито-перлитной или аустенитной стали с высокой пластичностью при наплавке многослойных износостойких композиций позволяет снизить уровень остаточных напряжений и повысить сопротивление термоусталостному разрушению. Однако технология нанесения таких композиций в случае одинаковых параметров режима наплавки всех слоёв не позволяет предотвратить недопустимое разбавление подслоя основным металлом и рабочим слоем, обеспечить заданный состав подслоя и его влияние на термостойкость композиции.

Одним из способов повышения термоусталостной стойкости наплавленных изделий является использование пластичного подслоя из низкоуглеродистой низколегированной стали [1, 2], а также подслоя из хромоникелевой аустенитной стали, который характеризуется более высокой пластичностью [3]. Испытания на термоциклирование образцов, полученных наплавкой на подложку из стали 40Х двух слоёв электродной проволокой Св-08А (подслой), а затем двух рабочих слоёв проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС, показали, что возрастает сопротивление зарождению и распространению термоусталостной трещины (по сравнению с наплавкой без подслоя) [1]. Вместе с тем, следует отметить, что способ испытания термоциклированием является одним из способов оценки сопротивления зарождению и распространению трещины, а применение пластичного подслоя для повышения работоспособности многослойной композиции является одним из вариантов трещиностойкой многослойной композиции с пластичными слоями [4, 5]. В этих работах обобщены результаты детальных исследований с использованием осциллографирования процесса распространения трещины (разрушения) и изучением микрофрактограмм изломов образцов, полученных при динамической и циклической нагрузке. Установлено, что пластичные прослойки в композиции повышают сопротивление разрушению, а также обеспечивают торможение трещины на границе с пластичной прослойкой. Кроме того, выявлено замедление трещины вплоть до её остановки в прослойке за счёт высокой вязкости разрушения. Остановка трещины в пластичном подслое отмечается также в металлографических исследованиях работы [1].

Рассматривая роль пластичного подслоя в многослойной композиции, необходимо отметить, что влияние подслоя на её термостойкость зависит от возможности обеспечить требуемый состав подслоя, учитывая его разбавление как основным металлом, так и рабочим слоем. Для уменьшения разбавления стремятся снизить эффективность проплавления, например, путём наплавки ленточным электродом. Однако даже при наплавке лентой сечением  $40 \times 0,5$  мм доля участия основного металла в составе промежуточного слоя составляет не менее 20...25 %. Для схемы нагрева полубесконечного тела линейным источником конечной ширины расчётные значения площади ( $F_{пр}$ ) и глубины проплавления ( $h_{max}$ ) возрастают с уменьшением температуры плавления и коэффициента теплопроводности основного металла (нижележащего слоя) [6]. Предварительно проведенные исследования показали, что такое снижение температуры плавления подслоя приводит к увеличению площади его проплавления при неизменной величине погонной энергии наплавки. По данным расчёта и экспериментов, такое увеличение площади проплавления подслоя может составлять до 20...25 % в зависимости от состава и теплофизических свойств сталей и сплавов. В наибольшей мере возрастание площади проплавления  $F_{пр}$  установлено в случае замены

подслоя из низкоуглеродистой стали Ст.3 (температура плавления 1530 °С) сталью 12X18Н9Т, температура плавления которой 1425 °С. Чтобы не допустить увеличения размеров зоны проплавления с изменением состава и свойств подслоя, предложен дифференцированный подход к выбору величины погонной энергии процесса наплавки слоёв многослойной композиции [7].

Целью статьи является разработка методики расчёта величины погонной энергии в зависимости от температуры плавления подслоя.

Изменение погонной энергии при наплавке подслоя относительно оптимальной величины для заданной геометрии наплавляемого изделия и размеров ленточного электрода целесообразно устанавливать в зависимости от соотношения теплофизических свойств материала изделия, подслоя, рабочего слоя. При одинаковой температуре плавления материалов рабочего слоя и подслоя погонная энергия наплавки наружного слоя должна соответствовать номинальной. В то же время, при наплавке подслоя на основной металл, величина погонной энергии должна быть одинаковой или несколько ниже погонной энергии наплавки рабочего слоя. Это позволяет ограничить разбавление подслоя основным металлом, однако, сохранить надёжное проплавление основного металла. В случае, если температура плавления материала подслоя ниже температуры плавления материала рабочего слоя, величина погонной энергии наплавки рабочего слоя должна быть ниже номинальной.

Применительно к роликам машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в качестве основного металла (материала ролика) используются стали 25X1М1Ф, 38ХМ, 40ХН2МА. В то же время, для наплавки рабочего слоя целесообразно использовать составы, которые обеспечивают необходимую коррозионную стойкость, а также теплостойкость и жаропрочность. Этим требованиям отвечают стали, содержащие 12...13 % хрома и 0,10...0,20 % углерода (10X13, 15X13, 20X13). В то же время, выбор химического состава электродов для наплавки подслоя может обеспечить получение низкоуглеродистой низколегированной стали, но также стали, позволяющей дополнительно легировать рабочий слой элементами, переходящими из подслоя. Исходя из этого, содержание хрома и других элементов в таком материале для наплавки подслоя должно быть более высоким, чем в материале для наплавки рабочего слоя. При этом, несмотря на различие составов подслоя и рабочего слоя, их температура плавления может быть одинакова. Например, при использовании для наплавки подслоя стали 06X17Г1С, а для рабочего слоя – стали 15X13, температура плавления этих сталей практически одинакова. Вместе с тем, для наплавки подслоя используются материалы, обеспечивающие высокое легирование не только хромом, но также никелем, молибденом, ниобием, которые при последующей наплавке переходят в рабочий слой. Введение этих элементов в состав наружного слоя позволяет стабилизировать структуру металла, увеличить его сопротивление растрескиванию, что повышает работоспособность роликов. Для применяемых с этой целью наплавочных материалов (например, коррозионностойких сталей 15X17Н7Г2, 12X18Н9Т, 03X17Н12М2, 07X18Н12Г2) температура плавления составляет 1400...1450 °С, что значительно ниже температуры плавления материала рабочего слоя из стали 15X13 (1530 °С). Кроме того, указанные стали значительно отличаются по коэффициентам теплопроводности и теплоёмкости, а также по температурной зависимости этих коэффициентов. Эти отличия приводят к существенному увеличению размеров зоны проплавления подслоя, что подтверждается результатами расчётов с использованием полученных при математическом моделировании сечений трёхмерной модели теплового поля изделия в плоскости, перпендикулярной наплавляемой поверхности, и согласуется с экспериментальными данными. При наплавке подслоя ленточным электродом шириной 60 мм и толщиной 0,5 мм глубина проплавления возрастает до 1,8...1,9 мм, а площадь проплавления – до 160...170 мм<sup>2</sup>. Кроме того, возрастает оцениваемая коэффициентом вариации неравномерность глубины проплавления, что особенно характерно для геометрии зоны проплавления при широкослойной однопроводной наплавке составным ленточным электродом, содержащем среднюю и две боковые ленты, расположенные под углом к средней.

С учётом необходимости ограничить размеры зоны проплавления в зависимости от теплофизических свойств материала подложки, для расчёта величины погонной энергии при наплавке рабочего слоя и подслоя предложена эмпирическая формула:

$$q_{\text{раб}} = q_{\text{ном}} [1 - \alpha \cdot (T_{\text{раб}}^{\text{пл}} - T_{\text{под}}^{\text{пл}}) / T_{\text{раб}}^{\text{пл}}]; \quad (1)$$

$$q_{\text{под}} \leq q_{\text{раб}}, \quad (2)$$

где  $q_{\text{ном}}$  – номинальная величина погонной энергии, кДж/см;

$q_{\text{раб}}$  – погонная энергия при наплавке рабочего слоя, кДж/см;

$q_{\text{под}}$  – погонная энергия при наплавке подслоя, кДж/см;

$T_{\text{раб}}^{\text{пл}}$  – температура плавления материала для наплавки рабочего слоя, °С;

$T_{\text{под}}^{\text{пл}}$  – температура плавления материала для наплавки подслоя, °С;

$\alpha$  – эмпирический коэффициент, зависящий от разности температуры плавления материала рабочего слоя и подслоя;  $\alpha = 2,0 \dots 5,0$ .

Расчёт величины погонной энергии согласно предложенным выражениям можно пояснить следующими примерами.

Пример 1. Наплавка ролика машины непрерывного литья заготовок диаметром 300 мм (материал ролика сталь 25Х1М1Ф, длина бочки 2000 мм, масса 1,25 т) осуществляется в 2 слоя (подслой и рабочий слой). При наплавке ролика диаметром 300 мм под флюсом АН-26 с использованием стальной ленты сплошного сечения  $40 \times 0,5$  мм номинальная величина погонной энергии 67,5 кДж/см (табл. 1). Для наплавки рабочего слоя применяется лента из стали 12Х13 (температура плавления  $T_{\text{раб}}^{\text{пл}} = 1530$  °С). Для наплавки подслоя применяется лента из стали 15Х17Н7Г2 (температура плавления  $T_{\text{под}}^{\text{пл}} = 1420$  °С). Поскольку температура плавления материала подслоя на 110 °С ниже температуры плавления материала рабочего слоя, величину погонной энергии наплавки рабочего слоя согласно выражению (1) уменьшают до  $q_{\text{раб}} = q_{\text{ном}} \cdot 0,79$ , что обеспечивают параметры режима, приведенные в табл. 1. При этом доля участия металла подслоя в рабочем слое составляет 20 %, что меньше, чем при наплавке на номинальной погонной энергии. Учитывая низкую температуру плавления материала подслоя ( $T_{\text{под}}^{\text{пл}} = 1420$  °С), с целью обеспечения надёжного проплавления основного металла (ролика) при наплавке подслоя, погонную энергию согласно выражению (2) выбирают равной погонной энергии наплавки наружного слоя:  $q_{\text{под}} = q_{\text{нар}}$ . При этом доля участия основного металла в составе подслоя составляет 18 %.

Таблица 1

Параметры режима наплавки

Параметры	Режим наплавки		
	номинальный	рабочего слоя	подслоя
Погонная энергия, кДж/см	67,5	53,7	53,7
Ток, А	520	500	500
Напряжение, В	32	30	30
Скорость, см/с	0,22	0,25	0,25
Доля участия, %	25	20	18

Пример 2. Для наплавки рабочего слоя применяется лента из стали 12Х13, а для подслоя – 10Х17М2ГН; температура плавления обоих составов практически одинакова (1530 °С). В этом случае погонная энергия наплавки рабочего слоя согласно выражению (1) равна номинальной погонной энергии  $q_{\text{раб}} = q_{\text{ном}}$ . Для наплавки подслоя используется

материал с температурой плавления, равной температуре плавления материала ролика. При этом доля участия подслоя в рабочем слое составляет 25 %. Чтобы ограничить проплавление основного металла, величину погонной энергии наплавки подслоя согласно зависимости (2) выбираем меньше погонной энергии наплавки наружного слоя:  $q_{\text{под}} = 0,85 \cdot q_{\text{раб}}$  (параметры режима наплавки рабочего слоя и подслоя приведены в табл. 2). Доля участия основного металла в составе подслоя составляет 20 %.

Таблица 2

## Параметры режима наплавки

Параметры	Режим наплавки		
	номинальный	рабочего слоя	подслоя
Погонная энергия, кДж/см	67,5	67,5	57,8
Ток, А	520	520	480
Напряжение, В	32	32	32
Скорость, см/с	0,22	0,22	0,24
Доля участия, %	25	25	20

## ВЫВОДЫ

При выборе параметров режима наплавки многослойных износостойких композиций с пластичным подслоем необходимо учитывать теплофизические свойства рабочего слоя и подслоя.

Для определения величины погонной энергии наплавки многослойной композиции предложена эмпирическая зависимость этой величины от температуры плавления материала рабочего слоя и подслоя.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябцев И. А. Влияние пластичного подслоя на термическую стойкость многослойного наплавленного металла / И. А. Рябцев, А. А. Бабинец, И. И. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2011. – № 10. – С. 22–25.
2. Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков / А. А. Бабинец, И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев, И. И. Рябцев, Г. Н. Гордань // Автоматическая сварка. – 2014. – № 5. – С. 17–21.
3. Исследование термомеханического состояния цилиндрических деталей, наплавленных слоями аустенитной и мартенситной стали / И. К. Сенченков, О. П. Червинко, Е. Турык, И. А. Рябцев // Сварочное производство. – 2007. – № 8. – С. 7–12.
4. Лецинский Л. К. Слоистые наплавленные и упрочнённые композиции / Л. К. Лецинский, С. С. Самотугин. – Мариуполь : Новый мир, 2005. – 392 с.
5. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лецинский, С. С. Самотугин, И. И. Пирч, В. И. Комар. – К. : Техника. 1990. – 109 с.
6. Мазур В. А. Влияние теплофизических свойств основного металла на геометрию зоны проплавления при наплавке ленточным электродом / В. А. Мазур, Л. К. Лецинский, В. Н. Матвиенко // Сварочное производство. – 2018. – № 3. – С. 10–14.
7. Пат. № 116526 Україна, МПК В23К 9/04. Спосіб наплавлення роликів безперервного лиття заготовок / Л. К. Лецинський, В. М. Матвієнко, В. О. Мазур ; заявитель и патентообладатель Приазовский гос. техн. ун-т. – № и 2016 12256 ; заяв. 02.12.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.