

И.М.Спиридонова, Г.В.Зинковский

**ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ,
НАПЛАВЛЕННЫХ ПОРОШКОВЫМИ
ЛЕНТАМИ И ПРОВОЛОКАМИ.**

Днепропетровский национальный университет

Изучены влияния температурных воздействий вплоть до 1000⁰С на структуру и свойства металла, наплавленного порошковыми лентами ПЛ АН–101, ПЛ АН–111, ПЛ АН–179, Нп–90ХРГС и порошковой проволокой ПП–ДБ–3. По результатам исследований предложен режим термической обработки для засыпных аппаратов доменных печей.

Детали металлургического оборудования подвергаются температурным воздействиям в процессе их изготовления и дальнейшей эксплуатации. Термические нагрузки приводят к структурным изменениям сплавов и соответственно их свойств. Поэтому вопрос изучения влияния температурных воздействий на технологические и эксплуатационные свойства материалов приобретает большое значение для совершенствования процессов изготовления и рациональной эксплуатации деталей металлургического оборудования.

Процесс наплавки изделий связан с термомодеформационным циклом, заключающимся в том, что близлежащие участки наплавляемого изделия и уже наплавленного сплава подвергаются тепловому воздействию, которое связано с протеканием местной пластической деформации. Термомодеформационный цикл наплавки приводит к возникновению остаточных сварочных напряжений в изделии, отрицательно влияет на его работоспособность. Задача снижения этих напряжений решается путем правильного выбора технологического процесса термической обработки.

В процессе эксплуатации наплавленные детали засыпных аппаратов доменных печей подвергаются длительным температурным воздействиям до 400⁰С и кратковременным нагревам до высоких температур. При этом коренным образом изменяется характер износа рабочих и контактных поверхностей засыпных аппаратов (Рис.1.) и как следствие их эксплуатационная стойкость.

Изучение влияния температурных воздействий на структуру и свойства наплавленных изделий явилось целью данного исследования. Для проведения исследований наплавлялись стальные образцы из стали 35Л размером 50х200х400 мм стандартными и экспериментальными порошковыми лентами по режимам, указанным в табл. 1. Наплавка образцов осуществлялась в условиях, приближенных к производственным. С этой целью металлические пробы жестко закреплялись с четырех сторон и непрерывно

охлаждались водой. После наплавки образцы подвергались охлаждению под слоем флюса. Из проб, наплавленных порошковыми лентами, вырезались образцы размером 10x50x50 мм (стандартный размер для образцов, подвергающихся испытаниям на газоабразивный износ).

Таблица 1. Режимы наплавки порошковых материалов

Наплавочный материал	Режимы наплавки			
	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость наплавки, м/час.	Шаг наплавки, мм
Порошковая лента ПЛ АН-101	700–800	32–34	50	12
Порошковая лента ПЛ АН-111	650–700	30–32	37,8	10
Порошковая лента Нп-90ХРГС	750–850	32–34	45	12
Порошковая лента ПЛ АН-179	750–850	32–34	50	12
Порошковая проволока ПП ДБЗ	300–350	27–29	85	6–8

На каждом образце производили 15 замеров твердости на твердомере Роквелла. Для оценки влияния температурных воздействий на структуру и свойства сплавов в процессе эксплуатации, наплавленные образцы подвергались нагреву в интервале температур 400–1000°С с длительностью выдержки 1–10 часов. Термообработка образцов осуществлялась в камерной печи с автоматически контролируемой температурой. Количество образцов в одной садке достигало 7 штук. Образцы помещались в центральной части рабочего пространства печи на специальной решетке для более равномерного нагрева. После нагрева до заданных температур с определенной выдержкой по времени образца медленно охлаждались с печью до комнатной температуры. Термически обработанные образцы подвергались испытаниям на твердость по шкале Роквелла и газоабразивный износ, который производился по методике и в условиях отдела сварки ДонНИИЧермета.

а)

б)

Рис.1. Вид изношенной контактной поверхности чаши засыпного аппарата при нормальном режиме эксплуатации (а) и при нарушении технологической дисциплины доменного процесса (б).

Для определения влияния температурных циклов при электродуговой наплавке на структуру и свойства наплавленного металла изготавливали образцы, по своему составу соответствующие сплавам, наплавленным порошковой лентой Нп-90ХРГС и порошковой проволокой ПП ДБЗ. Образцы весом до 30 г выплавлялись в печи сопротивления и подвергались термическим воздействиям при температурах 400–1000°С в течение 30 мин.

Металлографический анализ образцов наплавленного металла осуществляли на установке Epiquant.

Порошковая лента ПЛ АН–101. Сплав на основе железа (рис. 2), характеризующийся наличием первично выделившегося карбида хрома (с микротвердостью 15000–16000 МПа) и эвтектической матрицей, состоящей из карбида хрома и распавшегося твердого раствора легирующих элементов в γ -Fe.

Рис.2. Структура сплава, наплавленного ПЛ АН 101; $\times 300$.

Порошковая лента ПЛ АН–111. Условия термического цикла при наплавке контактных поверхностей больших конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей с шириной контактных поясов выше 150 мм приводят к высокой скорости охлаждения наплавленного металла. Для уменьшения, возникающих при этом, рыхлот и других дефектов кристаллизации наплавка осуществляется при изменении амплитуды колебаний электрода при наплавке. Поэтому исследованию подвергались сплавы, наплавленные порошковой лентой ПЛ АН–111 с амплитудами колебаний 150 мм и 300 мм.

Рис.3. Структура сплава, наплавленного ПЛ АН 111; $\times 300$.

Исходная структура (рис.3) состоит из твердого раствора легирующих элементов в никеле и карбидов хрома с микротвердостью 16000 МПа. Сплавы, наплавленные с амплитудой колебания 300 мм, имеют более мелкозернистую первично выделившуюся твердую фазу.

Порошковая лента ПЛ АН–179. При наплавке кристаллизуется сплав на железной основе (рис.4). Первично выделившиеся фазы с микротвердостью 16500 МПа являются, очевидно, твердыми растворами на основе карбидов хрома. Матрица состоит из эвтектической смеси распавшегося твердого раствора γ -Fe и карбидной составляющей.

Рис.4 Структура сплава, наплавленного ПЛ АН 179; $\times 300$.

Порошковая лента Нп–90ХРГС. Сплав на железной основе, имеющий эвтектическую матрицу (распавшийся твердый раствор γ -Fe и бориды Fe_2B) и избыточную фазу $(\text{Fe,Me})_2\text{B}$ (рис. 5). На линии сплавления образуется зона дендритов аустенита.

Рис.5 Структура сплава, наплавленного ПЛ Нп–90ХРГС; $\times 300$.

Порошковая проволока на основе карбида бора. Сплавы на железной основе характеризуются наличием боридов железа Fe_2B , эвтектической матрицы, в состав которой входят распавшийся твердый раствор $\gamma\text{-Fe}$ и цементит, легированный бором $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ (рис. 6).

Рис. 6 Структура сплава, наплавленного ПП–ДБ–3; $\times 300$.

При электродуговой двухслойной наплавке порошковыми лентами и проволоками сплавы подвержены тройному переплаву и многократным термическим воздействиям высоких температур. Влияние кратковременных термических циклов на структуру и свойства сплавов, наплавленных борсодержащими наплавочными материалами определялось на образцах, нагретых до $400\text{--}1000^\circ\text{C}$ с выдержкой 30 мин. – максимальным временем эффективного термического воздействия на металл при наплавке крупногабаритных деталей металлургического оборудования. Проведенные металлографические исследования показали, что структура сплавов и микротвердость фазовых составляющих и матрицы практически не изменились (рис.7).

Рис 7 Микротвердость железоборуглеродистых сплавов.

При нагреве сплавов, наплавленных порошковыми лентами, на железной и никелевой основе в интервале температур $400\text{--}1000^\circ\text{C}$ и выдержкой от 1 до 10 часов структура их практически не изменяется. При высоких температурах не наблюдается растворения избыточных фаз, их форма и размеры остаются без изменения. В сплавах на железной основе при температурах $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ и выдержках выше 1 часа наблюдается огрубление карбидных и боридных составляющих за счет их коалесценции (рис.8).

Рис.8. Структура эвтектической матрицы сплавов, наплавленных ПЛ АН 101, ПЛ АН 179 и ПЛ Нп–90ХРГС (слева – после наплавки; справа – после отжига 800°C , 10 часов); $\times 500$.

Общая твердость наплавленных сплавов (средняя величина из 15 уколов) приведена в Табл.2. В сплаве на никелевой основе наблюдается большой разброс по твердости в исходном состоянии и после отжигов. Твердость практически не зависит от нагревов до температуры 800°C для сплавов на железной основе и до 1000°C для никелевых сплавов.

Незначительное понижение общей твердости наблюдается в сплавах на железной основе при температуре 1000⁰С. Это, очевидно, можно объяснить коалесценцией карбидной и боридной составляющей в эвтектической матрице и снижением ее микротвердости.

Микродюрометрический анализ показал, что нагрев сплавов до 1000⁰С не влияет на микротвердость боридных и карбидных фаз (Табл.3). Несколько понижается микротвердость эвтектической матрицы на железной основе за счет коалесценции карбидной и боридной составляющей.

Таблица 3. Микротвердость фазовых составляющих сплавов, наплавленных порошковыми наплавочными материалами

Наплавочный материал, фазовые составляющие		Микротвердость, МПа		
		после наплавки	после наплавки и отжига	
				1000°С, 5 часов
Нп-90ХРГС	бориды матрица	15000–16000 7000–8000	15000–16000 6000	15000–16000 6000
ПЛ АН-111	карбиды матрица	15000–16000 5000	15000–16000 5000	15000–16000 5000
ПЛ АН-101	карбиды матрица	14000–15000 6000–7000	14000–15000 5000	14000–15000 5000
ПЛ АН-179	карбиды матрица	15000–16000 7000–8000	15000–16000 6000–7000	15000–16000 6000–7000
ПП-ДБ-3	бориды матрица	16000–16500 7000–8000	16000–16500 7000–8000	16000–16500 6000–7000

Эксплуатационные свойства сплавов, наплавленных порошковыми лентами ПЛ АН-101, ПЛ АН-111, ПЛ АН-179, Нп-90ХРГС, характеризуются стойкостью в условиях абразивного и газоабразивного износа. По результатам испытаний на газоабразивный износ сплавов, наплавленных порошковыми лентами, исследованные материалы располагаются в ряд в порядке убывания износостойкости: ПЛ АН-111 → Нп-90ХРГС → ПЛ АН-179 → ПЛ АН-101. Относительный износ сплавов, наплавленных указанными порошковыми лентами, представлен на рис. 9.

Результаты испытаний на газоабразивный износ наплавленных сплавов, подвергнутых нагреву, приведены в табл. 4. В этом случае в качестве эталонных применялись образцы, наплавленные соответствующими наплавочными лентами, а в кассете износу подвергались сплавы только одного состава, различающиеся режимами термической обработки. Термодеформационный цикл наплавки приводит к возникновению остаточных напряжений в наплавленном и основном металле. Наличие сварочных напряжений вредно влияет при определенных условиях на свойства и работоспособность конструкций и изделий. Наложение остаточных напряже-

ний на напряжения, приложенные извне, может привести к изменению формы изделия или даже разрушению.

Рис. 9 Относительный износ сплавов

Таблица 4. Износ сплавов, подвергнутых термической обработке

Наплавочный материал	Износ эталонных образцов, мг	Износ термообработанных образцов, мг		
		Температура нагрева, °С		
		600	800	1000
ПЛ АН-179	274	225	299	—
Нп-90ХРГС	260	—	242	276
ПЛ АН-101	468	471	494	515
ПЛ АН-111	354	350	358	—

Поэтому одним из основных вопросов является разработка параметров технологического процесса термической обработки для снятия остаточных напряжений, возникающих при наплавке. Для снижения или снятия внутренних напряжений в изделиях применяется отжиг. При выборе параметров отжига основное внимание уделяется процессу нагрева до необходимой температуры, выдержке при ней и скорости охлаждения. Отжиг для снятия напряжений проводится при температурах 600–650°С [1]. Температура, при которой снимаются напряжения, должна быть всегда выше максимальной температуры эксплуатации изделий. Особое значение для проведения отжига имеет режим нагрева и охлаждения деталей. Нагрев до изотермической выдержки необходимо производить таким образом, чтобы пониженные значения предела текучести при заданной температуре отжига были достигнуты равномерно по всему сечению. В случаях, когда отжигу подвергаются изделия, особенно подверженные опасности растрескивания из-за остаточных напряжений (чугуны), загрузку деталей следует вести в холодную печь [2].

Охлаждение после отжига для снятия напряжений является важнейшей стадией процесса поскольку неправильный режим охлаждения может привести к повышению напряжения по сравнению с исходным. В большинстве случаев охлаждение производят со скоростью 100°С/час.

Для практического определения продолжительности нагрева засыпного аппарата используем формулу [3]

$$\tau_{\text{общ}} = K_1 \frac{V}{F} K_{\phi} K_k + \tau_{\text{и.в.}} \quad (1.1)$$

где $\tau_{\text{общ.}}$ – общая продолжительность нагрева, включающая нагрев до заданной температуры и продолжительность изотермической выдержки при данной температуре. Продолжительность нагрева до заданной температуры зависит от форм изделий. Продолжительность изотермической выдержки зависит от состава и сходного состояния сплава;

K_1 – коэффициент, зависящий от состава и физических свойств сплава, температуры и способа нагрева;

K_1 – для сложнолегированных сплавов при 1000°C равен $0,8 \text{ мин/см}^3$

K_ϕ – критерий формы;

$\frac{V}{F}$ – характеристический размер, представляющий отношение объема

нагреваемого тела к его поверхности. Для конуса

$$\frac{V}{F} = \frac{(D-d)H}{4H + 2(D-d)} \quad (1.2)$$

где D – внешний диаметр основания конуса;

d – внутренний диаметр основания конуса;

H – высота засыпного аппарата в сборе;

$\frac{V}{F}$ – для конуса диаметром 5400 мм 23 см.

$$K_\phi = 1 + 0,2 \frac{H}{D-d} \quad (1.3)$$

K_ϕ – коэффициент конфигурации нагреваемого тела (0,8–1,0).

Общее время нагрева засыпного аппарата диаметром 5400 мм до заданной температуры составит

$$K_1 \frac{V}{F} K_\phi K_k = 8 \text{ мин/см}^3 \cdot 23 \text{ см} \cdot 2 \cdot 1 \approx 368 \text{ мин} \approx 6 \text{ часов}$$

т.е. процесс нагрева необходимо вести со скоростью 100°C/час .

Время изотермической выдержки обычно выбирается из расчета 3–4 мин на 1 мм сечения. Поскольку толщина засыпного аппарата в месте соприкосновения большого конуса и чаши составляет 130 мм, изотермическую выдержку принимаем $4 \text{ мин} \cdot 130 = 520 \text{ мин}$ или порядка 9 часов.

Выводы:

1. Предлагается режим термической обработки для засыпных аппаратов, наплавленных порошковой лентой Нп–90ХРГС: загрузка деталей в холодную печь, нагрев до температуры изотермической выдержки – 100°C/час , выдержка при температуре $600\text{--}650^\circ\text{C}$ в течение 9 часов, охлаждение со скоростью 100°C/час до комнатной температуры.

2. Кратковременный нагрев в интервале температур $600\text{--}800^\circ\text{C}$ практически не влияет на износостойкость сплавов, наплавленных порошковыми лентами ПЛ АН–101, ПЛ АН–111, ПЛ АН–179, Нп–90ХРГС.

3. Твердость сплавов, составляющая после наплавки порошковой лентой АН–111 40–52 , не зависит от кратковременных температурных

воздействий в интервале 400–1000⁰С. Твердость сплавов (56–62 HRC), наплавленных порошковыми лентами Нп–90ХРГС и ПЛ АН–179, при нагреве до 1000⁰С в течение 5 часов понижается на 3–5 единиц.

4. В сплаве, наплавленной лентой ПЛ АН–111, наблюдается большой разброс по твердости в исходном состоянии и после отжигов, Сплавы на железной основе имеют стабильные значения твердости.

5. Термические воздействия в интервале температур 400–1000⁰С не влияют на микротвердость боридных и карбидных фаз, при нагреве до 800–1000⁰С понижается микротвердость эвтектической матрицы в сплавах на железной основе.

6. При нагреве сплавов, наплавленных порошковыми лентами на железной и никелевой основах в интервале температур 400–1000⁰С и выдержкой от 1 до 10 часов, структура первично выделившихся боридов и карбидов не изменяется. В сплавах на железной основе при температурах 800–1000⁰С и выдержках выше 1 часа наблюдается коагуляция боридных и карбидных составляющих в эвтектической матрице.

1. *Термическая обработка в машиностроении*. Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 412 с.
2. *Технология термической обработки стали*/ Под редакцией М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1981. – 133 с..
3. *Тылкин М.А.* Справочник термиста ремонтной службы. – М.: Металлургия, 1981. – 347 с.