

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНОЙ ПОЛИГОНИЗАЦИОННОЙ СУБСТРУКТУРЫ В НАПЫЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЯХ

А. Н. ДУБОВОЙ, А. А. КАРПЕЧЕНКО, М. Н. БОБРОВ, Ю. Е. НЕДЕЛЬКО

НУК им. адм. Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9.

E-mail: laborantmtm@gmail.com

В работе изучена возможность формирования термически устойчивой наноразмерной полигонизационной субструктуры в напыленных электродуговых покрытиях из проволок марок Св-08Г2С и 12Х18Н10Т путем дополнительной деформации и предрекристаллизационной термической обработки. Показано, что проведение дополнительной деформации покрытий на 15...40 % позволяет повысить длительность выдержки при термической обработке до 90...180 мин без существенного падения твердости за счет снижения подвижности полигонизационных субграниц. Установлено, что размер областей когерентного рассеяния (ОКР) как деформированных, так и покрытий без деформации после проведения термической обработки (которая обеспечивает максимальную твердость) в 1,5...3,0 раза меньше, чем в состоянии после напыления. При увеличении продолжительности выдержки деформированных покрытий до 150 мин, размер их ОКР благодаря снижению подвижности субграниц увеличивается незначительно, что коррелируется с незначительным уменьшением твердости. В итоге проведение дополнительной деформации на 40 и 15 % и последующей термической обработки напыленных электродуговых покрытий из Св-08Г2С и 12Х18Н10Т позволяет формировать термически устойчивую наноразмерную полигонизационную субструктуру, которая обеспечивает повышенную твердость по сравнению с напыленным состоянием на 75 и 54 %, соответственно. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: деформация, полигонизационная субструктура, предрекристаллизационная термическая обработка, электродуговые покрытия

Современная тенденция развития технологии газотермического напыления заключается преимущественно в повышении физико-механических свойств покрытий путем наноструктурирования. Методы формирования наноструктур, такие как напыление ультрадисперсных [1, 2] и полученных механическим легированием и механическим синтезом порошков [3], превращение аморфной фазы в нанокристаллическую [4], требующие специальной подготовки порошка, являются достаточно сложными и трудоемкими и, как следствие, дорогими. Перспективным является применение предрекристаллизационной термической обработки (ПТО) напыленных покрытий [5, 6], что позволяет повысить их физико-механические свойства за счет получения измельченной и наноразмерной полигонизационной субструктуры.

Однако полученная полигонизационная субструктура имеет низкую термическую стойкость (до 10 мин) вследствие протекания процессов собирательной полигонизации во время длительной выдержки при повышенной температуре, что сдерживает применение ПТО для массивных изделий.

Целью данной работы является исследование возможности формирования термически устойчивой наноразмерной полигонизационной субструктуры в напыленных электродуговых покрытиях.

Для исследований выбрали электродуговые покрытия, поскольку они характеризуются высоким эффектом повышения твердости после ПТО и получением наноразмерной субструктуры [5]. Покрытие получали с помощью установки КДМ-2, которая укомплектована электродуговым распылителем ЭМ-14М на следующем режиме: напряжение на дуге 30 В, сила тока 110 А, давление сжатого воздуха 0,4...0,6 МПа, дистанция напыления 100 мм. В качестве напыляемого материала использовали сварочные проволоки марки Св-08Г2С и высоколегированную из стали 12Х18Н10Т диаметрами 1,2 мм. Оптимизацию режима ПТО покрытий проводили по показателям твердости. Твердость по Виккерсу *HV* определялась на приборе типа ТП при нагрузке на индентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4: 2008). Термическую обработку образцов проводили в лабораторной электрической печи ШОЛ-1.6.2.0.08/9-М1 при температуре 500 и 600 °С соответственно [6]. Дополнительное деформирование покрытий осуществляли прессованием на разные степени деформации. Результаты измерения твердости деформированных и термообработанных покрытий приведены на рис. 1.

Согласно с приведенными на рис. 1, а данными, использование последующей деформации покрытий обеспечивает меньшее снижение твер-

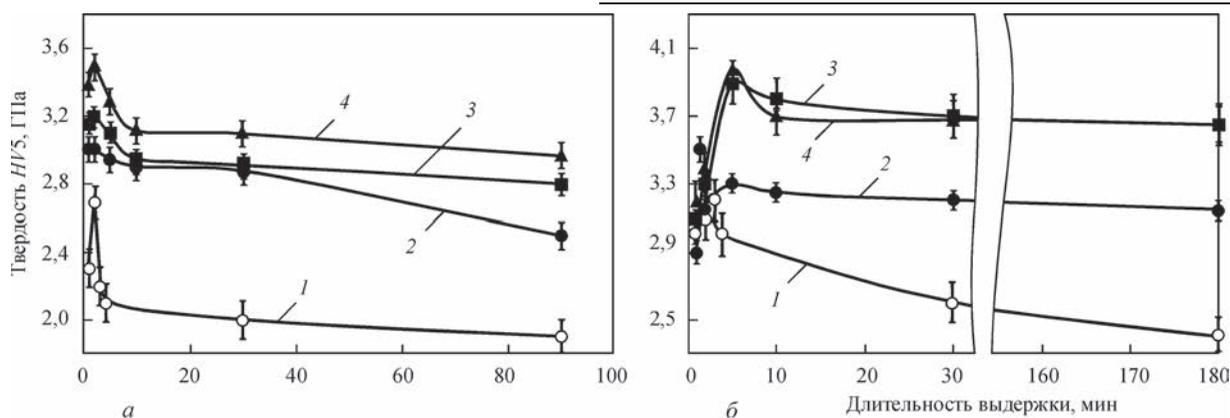


Рис. 1. Зависимость твердости электродуговых покрытий из проволоки Св-08Г2С (а) и 12Х18Н10Т (б) от длительности выдержки при термической обработке и степени дополнительной деформации (кривая 1 — без деформаций); для а: 2 — 20 ; 3 — 30 ; 4 — 40 %; для б: 2 — 10; 3 — 15; 4 — 20 %

дости при повышении продолжительности выдержки при ПТО до 90...180 мин. Так, для покрытия из проволоки Св-08Г2С без деформации при повышении продолжительности выдержки более 2 мин (максимум твердости) до 90 мин твердость снижается на 30 %. При использовании деформации покрытия на 20, 30 и 40 % и повышении продолжительности выдержки с 5 мин (максимум) до 90 мин твердость снижается на 17, 12 и 16 %, соответственно. Достаточную устойчивость и высокую твердость полигонизационной субструктуры обеспечивает деформация на 40 %.

Похожая зависимость наблюдается и для покрытий, полученных из проволоки 12Х18Н10Т (рис. 2, б). Для покрытия без деформации при по-

вышении продолжительности времени выдержки с 3 до 180 мин твердость снижается на 25 %. При использовании дополнительной деформации на 10, 15, 20 % и повышении продолжительности выдержки с 5 до 180 мин твердость снижается на 7, 5 и 8 % соответственно. В этом случае высочайшую стабильность полигонизационной субструктуры обеспечивает деформация на 15 %.

Объясняется это тем, что при осуществлении повторной деформации дислокационное взаимодействие заканчивается возникновением от 50 до 75 % дислокационных барьеров (Хирта, Ломер-Коттрелла), остальные участвуют в формировании дислокационных сплетений. Данные дислокационные барьеры, которые возникают вдоль

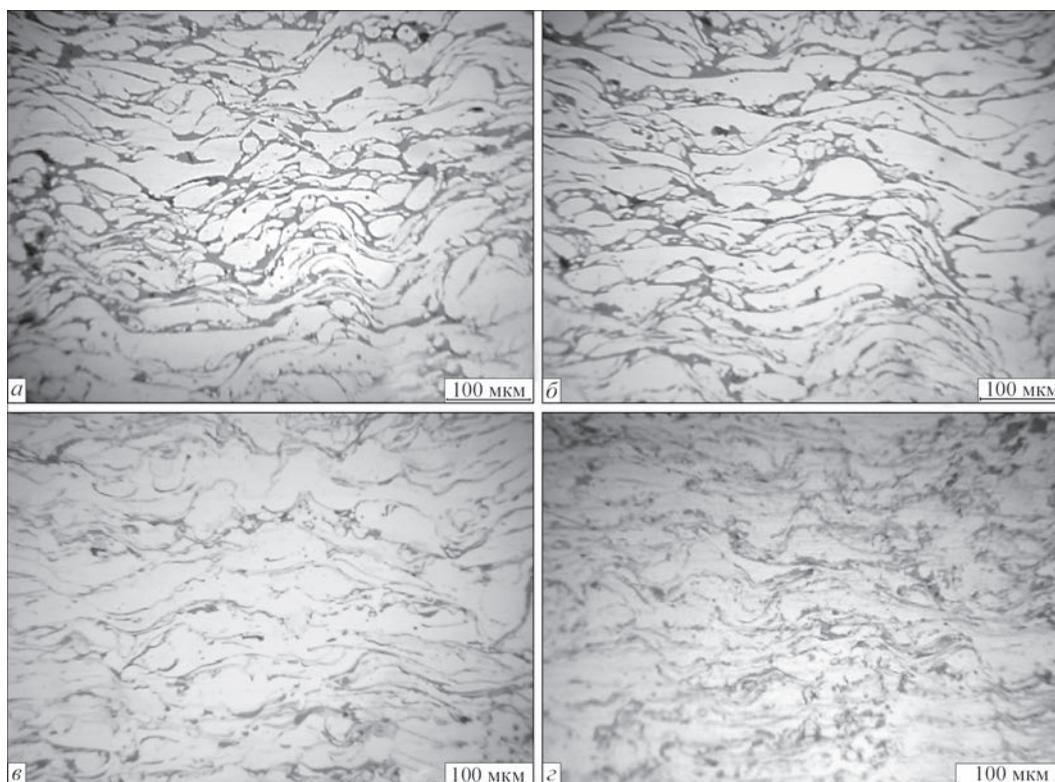


Рис. 2. Микроструктура электродуговых покрытий из проволок Св-08Г2С (а, б) и 12Х18Н10Т (в, г): а, в — после напыления; б — после ПТО (3 мин, 600 °С); г — после деформации при нагрузке 20 т

Зависимость размеров ОКР рентгеновского излучения электродуговых покрытий от вида обработки

Материал покрытия	Вид обработки	ОКР, нм
Св-08Г2С	После напыления	200
	Напыление + ПТО (2 мин, 500 °С)	62
	Напыление + деформация на 30 %	163
	Напыление + деформация на 30 % + ПТО (5 мин, 500 °С)	82
	Напыление + деформация на 30 % + ПТО (90 мин, 500 °С)	111
12Х18Н10Т	После напыления	200
	Напыление + ПТО (3 мин, 600 °С)	153
	Напыление + деформация на 15%	164
	Напыление + деформация на 15 % + ПТО (5 мин, 600 °С)	87
	Напыление + деформация на 15 % + ПТО (150 мин, 600 °С)	138

направления, перпендикулярного оси деформации, сдерживают движение дислокаций и, как следствие, уменьшают подвижность полигонизационных субграниц, таким образом, снижая скорость полигонизационных процессов, обеспечивают стабилизирующий эффект [7].

Максимальная продолжительность выдержки 90 мин для проволоки Св-08Г2С, 150 мин для 12Х18Н10Т обеспечивают повышение твердости по сравнению с состоянием после напыления на 75 и 54 %, соответственно, за счет повышения термической устойчивости полигонизационной субструктуры благодаря деформированию покрытий.

Микроструктуру покрытий исследовали при помощи оптического металлографического микроскопа ММУ-3.

Исследование микроструктуры электродуговых покрытий из проволоки 12Х18Н10Т, которые приведены на рис. 2, показало, что после ПТО по сравнению с исходной, изменений не наблюдается (рис. 2, а, б).

Покрытия имеют типичную чешуйчатую микроструктуру. После напыления среднее значение толщины lamелей составляет около 14 мкм (рис. 2, в), деформация прессованием на 15 % вызывает уменьшение этого параметра до 11,9 мкм (рис. 2, г).

Влияние деформации и ПТО на субструктуру напыленных покрытий оценивали по изменению размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) рентгеновского излучения методом аппроксимации [8]. Поскольку ОКР соответствует внутренней упорядоченности области зерна и не включает сильно искаженные границы, размер ОКР отождествляют со средним размером кристаллитов [8]. Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 в CuK_α -излучении ($\lambda = 0,154$ нм) с использованием Ni β -фильтра. Вращение образцов осуществлялось в интервале двойных углов от 30 до 100°, скорость развертки составляла 1 град/мин. Результаты исследований приведены в таблице.

Согласно приведенным данным, размер ОКР (субзерен) как деформированных, так и покрытий

без деформации после проведения ПТО, которая обеспечивает максимальную твердость, в 1,5...3,0 раза меньше, чем в состоянии после напыления. При увеличении продолжительности выдержки до 90 и 150 мин деформированных из Св-08Г2С и 12Х18Н10Т покрытий, размер их ОКР благодаря снижению подвижности субграниц увеличивается незначительно, что коррелируется с незначительным уменьшением твердости (см. таблицу). При выдержке несколько меньшей, 45 и 60 мин, соответственно, размер ОКР для обоих покрытий составляет около 96 нм.

Таким образом, проведение дополнительной деформации на 40 и 15 % и ПТО напыленных электродуговых покрытий из Св-08Г2С и 12Х18Н10Т позволяет формировать термически устойчивую наноразмерную полигонизационную субструктуру, которая обеспечивает повышенную твердость по сравнению с напыленным состоянием на 75 и 54 %, соответственно.

1. Thermal sprayed nanostructured WC/Co hardcoatings / B. H. Kear et al. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2000. – Vol. 9. – P. 399–406.
2. Siegmann S., Brandt O., Drovak D. Thermally sprayed wear resistant coatings with nanostructured hard phases // Ibid. – 2004. – Vol 3. – P. 37–43.
3. Получение порошков для газотермических покрытий методами механического легирования и механохимического синтеза / Ю. С. Борисов и др. // Сварочное производство. – 2010. – № 12. – С. 18–22.
4. Калита В. И. Физика, химия и механика формирования покрытий, упрочненных наноразмерными фазами // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 4. – С. 46–57.
5. Вплив передрекристилізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напылених покриттів та деформованих металів і сплавів / О. М. Дубовий та ін. // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3. – С. 7–11.
6. Спосіб нанесення покриттів: пат. 88755 Україна. № а 2009 02658; заявл. 23.03.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.
7. Спосіб деформаційно термічної обробки електродугових покриттів: пат. у 2015 10721 Україна. № 106450; заявл. 03.11.15; опубл. 25.04.16; Бюл. № 8.
8. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1970. – 336 с.

О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко,
М. М. Бобров, Ю. С. Неделько

НУК ім. адм. Макарова.
54025, м Миколаїв, просп. Героїв України, 9.
E-mail: laborantmtm@gmail.com

**ФОРМУВАННЯ НАНОРОЗМІРНОЇ
ПОЛІГОНІЗАЦІЙНОЇ СУБСТРУКТУРИ
В НАПИЛЕНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТЯХ**

У роботі вивчена можливість формування термічно стійкої нанорозмірної полігонізаційної субструктури в напилених електродугових покриттях з дротів марок Св-08Г2С і 12Х18Н10Т шляхом додаткової деформації і предрекристалізаційної термічної обробки. Показано, що проведення додаткової деформації покриттів на 15...40 % дозволяє підвищити тривалість витримки при термічній обробці до 90...180 хв без істотного падіння твердості за рахунок зниження рухливості

полігонізаційних субграниць. Встановлено, що розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) як деформованих, так і покриттів без деформації після проведення термічної обробки (яка забезпечує максимальну твердість) в 1,5...3,0 рази менше, ніж в стані після напилення. При збільшенні тривалості витримки деформованих покриттів до 150 хв, розмір їх ОКР завдяки зниженню рухливості субграниць збільшується незначно, що корелюється з незначним зменшенням твердості. В результаті проведення додаткової деформації на 40 і 15 % і подальшої термічної обробки напилюваних електродугових покриттів з Св-08Г2С і 12Х18Н10Т дозволяє формувати термічно стійку нанорозмірну полігонізаційну субструктуру, яка забезпечує підвищену твердість у порівнянні з напиленим станом на 75 і 54 %, відповідно. Бібліограф. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: деформація, полігонізаційна субструктура, предрекристалізаційна термічна обробка, електродугове покриття

Поступила в редакцію 05.01.2017

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«СВАРКА: СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ»**

19–20 апреля 2017 г.

г. Москва

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Развитие сварки и родственных технологий в Российской Федерации. *Токарев О. П.*, Министерство промышленности и торговли РФ.

Международный институт сварки — интегратор знаний и опыта в области сварки и смежных технологических процессов. *Сесиль Майер (Dr Cécile Mayer)*, Исполнительный директор Международного института сварки (IIW).

Гармонизация национальных стандартов с международными – как направление развития национальной системы технического регулирования и стандартизации. *Леонидов К. В.*, Министерство промышленности и торговли РФ.

Роль промышленности в разработке закона о стандартизации и его реализации. *Лоцманов А. Н.*, Министерство промышленности и торговли РФ.

Современные подходы к стандартизации технологических процессов. Взаимосвязь Технических регламентов и стандартов. *Шалаев А. П.*, Росстандарт.

Международные стандарты и практика IIW и EWF по оценке соответствия сварочного производства. *Крис Иди (Mr Chris Eady)*, Президент Европейской сварочной федерации (EWF).

Требования к качеству сварки и процедуры квалификации технологий и сертификации персонала в стандартах API, ASME, ASTM.

Оценка соответствия системы качества и безопасности сварочных процессов в Российской Федерации. *Волкова Н. Н.*, НУЦ «Контроль и диагностика».

Нормативно-правовое регулирование в области сварки. Оценка регулирующего воздействия. *Бурых В. В.*, МГТУ им. Н.Э.Баумана.

СЕКЦИЯ I. Стандартизация в области сварки и смежных технологий в отраслях промышленности России

СЕКЦИЯ II. Международная стандартизация в области сварки

СЕКЦИЯ III. Опыт проведения оценки соответствия составляющих элементов сварочного производства