

## СТРУКТУРА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА, УПРОЧНЕННОГО КАРБИДАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

И.А. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, А.И. ПАНФИЛОВ<sup>2</sup>, А.А. БАБИНЕЦ<sup>1</sup>, И.И. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, Г.Н. ГОРДАНЬ<sup>1</sup>, И.Л. БАБИЙЧУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> ОАО «Стил Ворк». 50069, Днепропетровская обл., г. Кривой Рог, пр-т Мира, 50, оф. 32. E-mail: ogs@steel-work.net

Исследована износостойкость при изнашивании закрепленным и незакрепленным абразивом металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН192 (упрочнение карбидами титана) и порошковой проволокой Hardface hc-o (упрочнение карбидами хрома). Установлено, что оба типа наплавленного металла, несмотря на различное общее содержание легирующих элементов (30 % — Hardface hc-o и 10 % — ПП-АН192), имеют примерно одинаковую износостойкость. Структура наплавленного металла обоих типов состоит из мартенсита, небольшого количества остаточного аустенита и карбидов различного состава. При этом высокая износостойкость металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН192, объясняется тем, что содержащийся в нем карбид титана по твердости и износостойкости значительно превосходит карбиды хрома, которые упрочняют металл, наплавленный порошковой проволокой Hardface hc-o. Библиогр. 10, табл. 4, рис. 6

*Ключевые слова:* наплавленный металл, порошковые проволоки, абразивное изнашивание, износостойкость, микроструктура, карбиды

В наплавочных материалах, которые применяются для восстановления и упрочнения деталей, эксплуатирующихся в условиях различных видов интенсивного абразивного изнашивания, в качестве основных легирующих элементов используются энергичные карбидообразователи: хром, титан, ванадий, вольфрам и др. [1–7]. Они образуют в структуре наплавленного металла твердые фазы в виде карбидов, карбонитридов, карбоборидов и т.п. Эти фазы, являясь наиболее твердой составляющей наплавленного металла, в значительной степени определяют его износостойкость [1–4]. Химический состав, кристаллическое строение и некоторые свойства карбидов упомянутых металлов приведены в табл. 1 [8].

Карбиды могут быть первичными или вторичными, а также образовывать различные кар-

бидные (боридные) эвтектики. Эти карбидные выделения кристаллизуются при различных температурах и по-разному располагаются в матрице наплавленного металла, состоящей из аустенита и продуктов его превращения при охлаждении. Характер образующихся карбидов и их расположение в структуре в первую очередь зависят от химического состава наплавленного металла, а также от температуры перегрева расплава сварочной ванны и условий его охлаждения. Расположение карбидов и форма их выделений заметно влияют на свойства материалов: их износостойкость, твердость, ударостойкость.

При прочих равных условиях, чем выше твердость карбидов, тем выше износостойкость наплавленного металла. Если один и тот же элемент образует несколько типов карбидов, отличающих-

Таблица 1. Свойства карбидов основных карбидообразующих металлов [8]

Карбид	Тип кристаллической решетки	Микротвердость, МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура плавления, °С
Fe <sub>3</sub> C	Ромбическая (орторомбическая)	8400...8600	7,62	1650
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Орторомбическая	22800	6,68	1895
Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Гексагональная (тригональная)	22000	6,90	1780
Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Сложная кубическая	16500	7,00	1520
W <sub>2</sub> C	Гексагональная	30000	17,15	2850
WC	Гексагональная	17000	15,70	2600
VC	Кубическая ГЦК	27000	5,36	2830
TiC	Кубическая ГЦК	32000	4,93	3100
NbC	Кубическая ГЦК	24000	7,78	3490

Таблица 2. Химический состав (мас. %) и твердость наплавленного металла

Порошковая проволока	C	Mn	Si	Cr	Ti	Mo	Твердость HRC
Hardface hc-o	3,60	1,32	1,47	25,90	-	0,30	60...63
ПП-АН192	1,43	0,65	0,72	4,62	3,42	0,47	56...59

ся по химическому составу, твердости и кристаллическому строению, то свойства наплавленного металла с этими карбидами будут различными.

При этом необходимо учитывать тот факт, что, как правило, наплавочные материалы легируются несколькими элементами, в результате в наплавленном металле образуются карбиды, в которых основной карбидообразующий элемент замещается другими элементами, что может повлиять на свойства образующихся карбидов.

Большое влияние на износостойкость наплавленного металла оказывает структурное состояние его матрицы. С одной стороны, она должна хорошо удерживать частицы твердой фазы и препятствовать их выкрашиванию в процессе изнашивания. С другой стороны, матрица сама должна иметь достаточно высокую твердость и хорошо сопротивляться изнашиванию. Опыт показывает, что лучшие результаты при интенсивном абразивном изнашивании обеспечивает высоколегированная мартенситно-аустенитная матрица [1, 3, 7, 9].

Содержание остаточного аустенита в структуре наплавленного металла зависит от интенсивности ударных нагрузок, которые сопровождают процесс изнашивания. При этом, чем выше интенсивность ударных нагрузок, тем больше остаточного аустенита должно быть в структуре наплавленного металла, который обеспечивает последнему достаточную вязкость и пластичность [1]. По некоторым данным [9] карбиды лучше удерживают

ся матрицей сплавов если на границе карбид-матрица возникает когерентная связь или прочное сопряжение между кристаллическими решетками карбидов и матрицы [10].

Таким образом, необходимо, чтобы в наплавочный материал было введено такое количество легирующих элементов и углерода, которое обеспечивает получение прочной и достаточно пластичной матрицы наплавленного металла и необходимого содержания в последнем твердой фазы (карбидов, карбонитридов, карбоборидов и т.д.).

С учетом изложенного была поставлена цель провести оценку влияния структуры и карбидов различного типа на износостойкость наплавленного металла при абразивном изнашивании закрепленным и незакрепленным абразивом.

Исследовалась и сравнивалась износостойкость и структура двух типов наплавленного металла, предназначенного для эксплуатации в условиях абразивного изнашивания: один упрочнялся карбидами хрома; другой — карбидами и карбонитридами титана. Для наплавки образцов использовали самозащитные порошковые проволоки: Hardface hc-o диаметром 1,6 мм производства компании Велдинг эллойс и ПП-АН192 диаметром 2,0 мм производства ИЭС им. Е.О. Патона. Химический состав и твердость наплавленного металла приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, суммарное содержание легирующих элементов в металле, наплавленном порошковой проволокой Hardface hc-o, превышает 30 %, а в металле, наплавленном порошковой проволокой ПП-АН192, находится на уровне 10 %.

Для исследования износостойкости указанными марками порошковых проволок были наплавлены в один и два слоя заготовки из стали Ст3, из которых вырезались образцы размером 50×50×10 мм, наплавленная поверхность которых была прошлифована. Исследования износостойкости проводили по двум методикам: при трении наплавленных образцов незакрепленным абразивом по ГОСТ 23.208–79 и, для сравнения, при трении закрепленным абразивом.

В процессе испытаний при трении незакрепленным абразивом образец 4 наплавленной поверхностью с усилием  $P$  прижимается к вращающемуся резиновому диску 1 (рис. 1). Кварцевый песок 5 из емкости 6 подается на резиновый диск 1. При вращении резиновый диск захватывает песок, который изнашивает образец 4.

Кварцевый песок перед испытаниями просушивали, в результате влажность песка не превы-

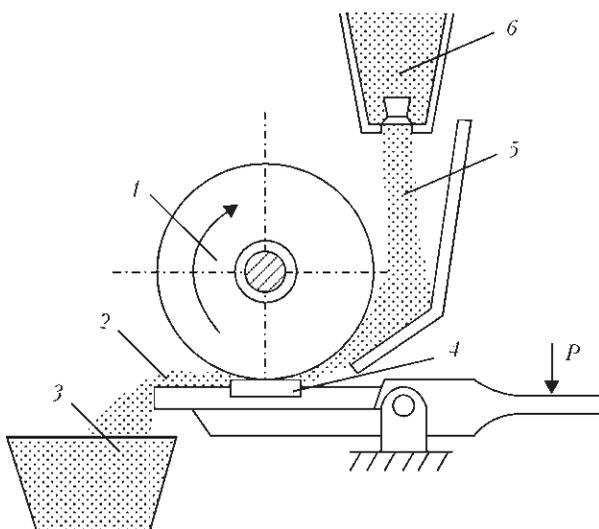


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования абразивного изнашивания незакрепленным абразивом: 1 — резиновый диск; 2 — использованный кварцевый песок; 3 — емкость для сбора использованного абразива; 4 — исследуемый образец; 5 — свежий кварцевый песок; 6 — емкость со свежим кварцевым песком

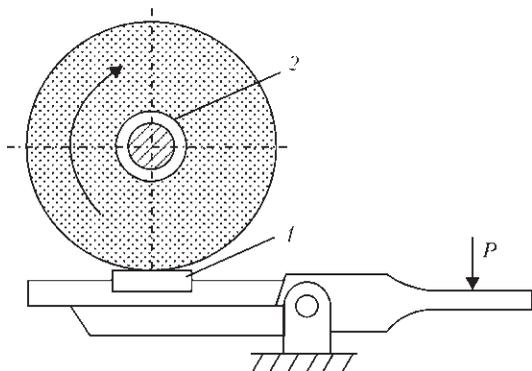


Рис. 2. Принципиальная схема установки для исследования изнашивания образцов жестко закрепленным абразивом: образец (1); абразивный круг (2)

шала 0,16 %. Для удаления внедрившихся в резиновый диск частиц песка его перед каждым испытанием обрабатывали шлифовальной шкуркой (тип 2 по ГОСТ 6456–75) зернистостью № 8П (ДСТУ 3647–71). Шкурка закреплялась на державку в виде плоской стальной пластины.

Диаметр резинового диска 48...50 мм; ширина  $15 \pm 0,1$  мм. Режим трения: усилие прижатия  $P = 2,4$  Н; скорость вращения диска 25 м/мин; кварцевый песок с размером частиц — 200...1000 мкм. Износ оценивали по потере массы образцов с точностью до  $2 \cdot 10^{-4}$  г.

Сравнительные исследования изнашивания при трении закрепленным абразивом проводили на установке, схема которой приведена на рис. 2. В качестве изнашивающего элемента использовали диск из электрокорунда среднемягкой твердо-

сти СМ-2 на керамической связке 7К15 диаметром 150 мм и шириной 8 мм (рис. 2). Зернистость электрокорунда составляет 250...315 мкм, линейная скорость трения 100 м/мин, нагрузка в зоне контакта 1,5 Н. Износ оценивали по потере массы образцов с точностью до  $2 \cdot 10^{-4}$  г.

Результаты испытаний по обеим методикам приведены в табл. 3.

Как показывают данные, приведенные в табл. 3, двухслойная наплавка обоими типами порошковых проволок обеспечивает более высокую износостойкость. Это объясняется тем, что первый наплавленный слой в результате перемешивания с основным металлом имеет химический состав, который отличается от оптимального. Следует отметить, что несмотря на разную степень легирования, износостойкость наплавленного металла обоих типов находится примерно на одном уровне. По-видимому, на износостойкость влияет структура наплавленного металла, содержание и свойства образующихся в нем карбидов.

Исследовали микроструктуру наплавленного металла двух составов и переходной зоны на границе наплавленный металл — основной металл (сталь Ст3).

Травление образцов проводилось поэтапно. Сначала электролитически в 20%-м растворе хромовой кислоты. Этот реактив выявляет структуру наплавленного металла. Затем провели химическое травление образцов в 4 %-м растворе азотной кислоты для выявления структуры основного металла.

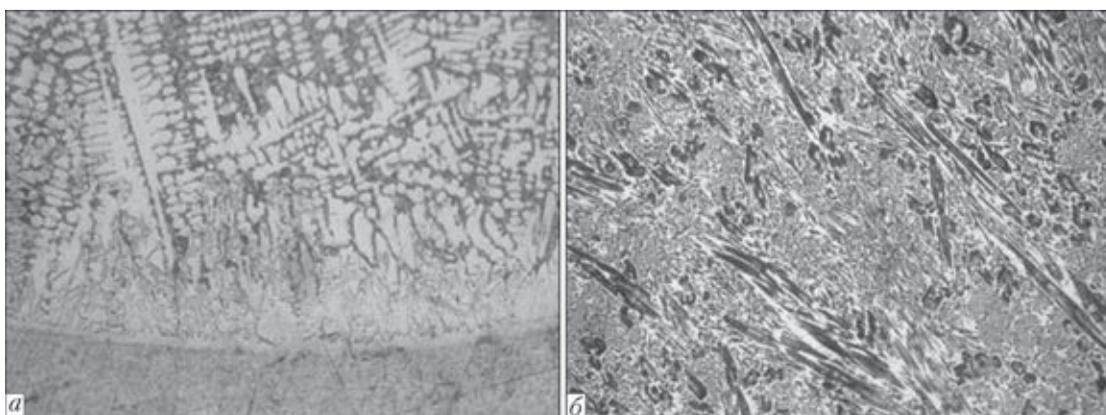


Рис. 3. Микроструктура переходной зоны (а) и металла (б), наплавленного порошковой проволокой Hardface hc-o

Таблица 3. Результаты испытаний износостойкости наплавленного металла при трении незакрепленным и закрепленным абразивом

Марка материала	Количество наплавленных слоев	Потеря массы при изнашивании, г		Износостойкость при трении незакрепленным абразивом	Износостойкость при трении закрепленным абразивом
		Незакрепленный абразив	Закрепленный абразив		
Hardface hc-o	Один	0,030	0,047	4,03	2,76
	Два	0,028	0,019	4,32	6,84
ПП-АН192	Один	0,027	0,042	4,48	3,09
	Два	0,024	0,021	5,04	6,19
Эталон сталь 40Х	-	0,121	0,130	1	1

Таблица 4. Размеры карбидов различного типа в металле, наплавленном порошковой проволокой Hardface hc-o

Количество наплавленных слоев	Размер стороны карбидов гексагональной формы, мкм		Длина карбидов «карандашного» типа, мкм	
	у линии сплавления	в центре наплавленного слоя	у линии сплавления	в центре наплавленного слоя
Один	15...35	5...15	200...350	250...300
Два	10...12	20...30	200	400...660

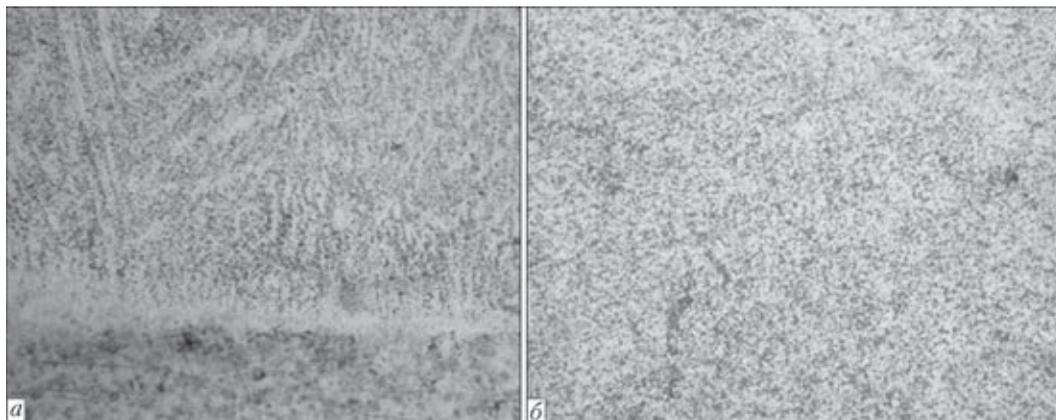


Рис. 4. Микроструктура переходной зоны (а) и металла (б), наплавленного порошковой проволокой ПП-АН192

Микроструктура металла, наплавленного порошковой проволокой Hardface hc-o, состоит из мартенситно-аустенитной основы, первичных карбидов в виде крупных пластин «карандашного» типа, вторичных карбидов, имеющих гексагональную огранку, с четкой границей сопряжения с матрицей, а также карбидной эвтектики (рис. 3, а, б).

Твердость карбидов находится в пределах  $HV\ 0,5 = 10950...14130$  МПа. Таким образом, по твердости они могут быть отнесены к карбидам типа  $Me_{23}C_6$  (см. табл. 1). Вдоль линии соедине-

ния выявлена нетравящаяся белая полоска шириной  $5...10$  мкм, твердость которой составляет  $HV\ 0,5 = 3170...3580$  МПа. Твердость наплавленного металла в центре наплавленного слоя составляет  $HV\ 10 = 7420$  МПа, у линии сплавления она несколько ниже  $HV\ 10 = 6730$  МПа

Был также проведен замер средней длины карбидов «карандашного» типа и граней карбидов гексагональной формы (табл. 4). Карбиды «карандашного» типа имеют значительный размер, что может приводить к их выкрашиванию в процессе изнашивания.

Микроструктура металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН192, представляет собой мартенсит и остаточный аустенит с выделениями очень мелких карбидов и карбонитридов титана (рис. 4, а, б). При этом в приповерхностных слоях наплавленного металла карбидные выделения крупнее и в количественном отношении их больше, чем у линии сплавления. Вдоль линии сплавления с основным металлом образуется слаботравящаяся полоска шириной  $5...20$  мкм, имеющая твердость  $HV\ 0,5 = 3100$  МПа. Твердость наплавленного металла у линии сплавления составляет  $HV\ 0,5 = 5020...5090$  МПа, в центре наплавленного слоя —  $HV\ 0,5 = 5490$  МПа, что несколько ниже, чем у металла, наплавленного порошковой проволокой Hardface hc-o. Твердость карбидов замерить не удалось из-за их небольшой величины.

На микрорентгеноспектральном анализаторе исследовали распределение основных легирующих элементов в зоне сплавления при наплавке порошковыми проволоками Hardface hc-o (рис. 5, а, б) и ПП-АН192 (рис. 6, а, б).

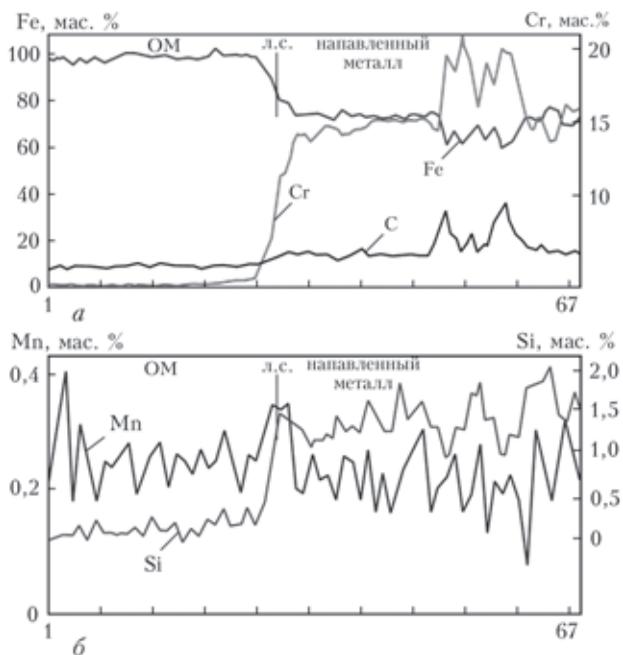


Рис. 5. Распределение железа, хрома, углерода (а), марганца и кремния (б) в ЗТВ при наплавке порошковой проволокой Hardface hc-o на образец стали Ст3

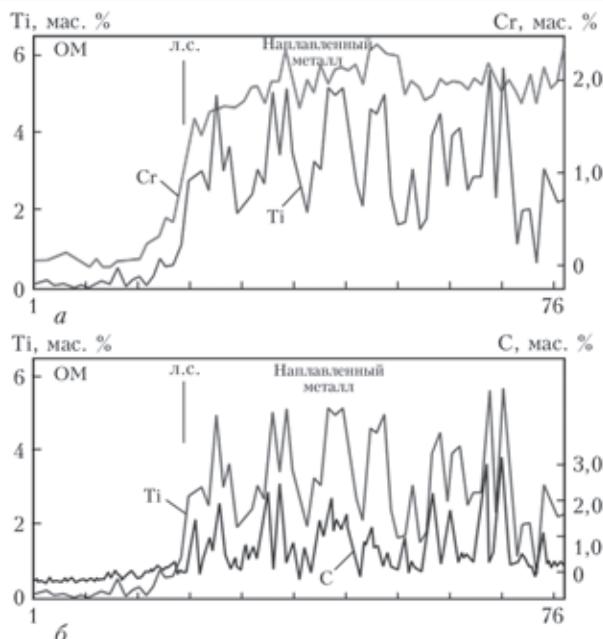


Рис. 6. Распределение хрома, титана (а), углерода и титана (б) в ЗТВ при наплавке порошковой проволокой ПП-АН192 на образец стали Ст3

Как видно из рис. 5, а, б, в металле, наплавленном порошковой проволокой Hardface hc-о, хром частично связывается в карбиды, частично легирует матрицу. В металле, наплавленном порошковой проволокой ПП-АН192, практически весь титан связывается в карбиды в соотношении с углеродом 4:1. Хром, в основном, легирует матрицу наплавленного металла (рис. 6, а, б).

По твердости карбид титана значительно превосходит все три типа карбида хрома (см. табл. 1). Кроме того, карбиды хрома по размерам значительно крупнее карбидов титана и ввиду относительно небольшой прочности могут выкрашиваться в процессе изнашивания. По-видимому, в силу этих обстоятельств металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН192, не уступает по износостойкости металлу, наплавленному порошковой проволокой Hardface hc-о, несмотря на меньшее общее содержание легирующих элементов.

## Выводы

1. Исследована износостойкость при изнашивании закрепленным и незакрепленным абразивом металла, наплавленного порошковыми проволоками Hardface hc-о и ПП-АН192. Установлено, что оба типа наплавленного металла несмотря на различное общее содержание легирующих элементов (30 % — Hardface hc-о и 10 % — ПП-АН192) имеют примерно одинаковую износостойкость.

2. Высокая износостойкость металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН192, объясняется тем, что содержащиеся в нем карбиды титана по твердости и износостойкости превосходят карбиды хрома, которые упрочняют металл, наплавленный порошковой проволокой Hardface hc-о.

1. Лившиц Л.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. Абразивный износ. — М.: Машиностроение, 1969. — 188 с.
2. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. — М.: Наука, 1970. — 252 с.
3. Износостойкость и структура твердых наплавов / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев, Е.С. Беркович и др. — М.: Машиностроение, 1971. — 94 с.
4. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. — Киев: ЕкоТехнологія, 2013. — 400 с.
5. Структура и свойства высокоуглеродистых высокованадиевых сплавов на железной основе для наплавки / Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев, В.Г. Васильев, Х. Хайнце // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2003. — № 5. — С. 36–40.
6. Порошковые проволоки для наплавки, разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона / И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев, А.П. Жудра, Г.А. Кирилук // Сварщик. — 2002. — № 2. — С. 34–35.
7. Рябцев И.А., Кондратьев И.А., Васильев В.Г., Дорошенко Л.К. Износостойкость наплавленного металла системы легирования Fe–C–Cr–Ti–Mo // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 48–51.
8. Киффер Р., Бенезовский Ф. Твердые сплавы. — М.: Металлургия, 1971. — 392 с.
9. Фрумлин И.И., Рябцев И.А., Головащук А.И. Влияние структурных превращений на износостойкость карбидной стали У25Х6Т4М // Автомат. сварка. — 1974. — № 9. — С. 23–25.
10. Палатник Л.С., Патцров И.И. Ориентированная кристаллизация. — М.: Металлургия, 1964. — 408 с.

Поступила в редакцию 10.04.2015

## ■ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОКОВКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Упрочняющая высокочастотная механическая проковка (ВМП) сварных соединений является развитием технологий поверхностного пластического деформирования металлов и применяется для повышения служебных характеристик сварных соединений конструкций различного назначения прежде всего для повышения их сопротивления усталости. Поверхностное пластическое деформирование металла при ВМП осуществляется в результате механического импульсного действия ударных элементов ручного инструмента, возбуждаемых ультразвуковым генератором. Для упрочнения сварных соединений в целях повышения сопротивления усталости при ВМП пластическому деформированию подвергается только зона сплавления шва с основным металлом шириной 4–7 мм.