

# ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ НА БАЗЕ ЛИТЫХ КАРБИДОВ ВОЛЬФРАМА

А. И. СОМ, канд. техн. наук (Фирма «Плазма-мастер, Лтд.», г. Киев)

Исследована зависимость износостойкости наплавленного металла от количества и формы армирующих частиц релита, способа их ввода в сварочную ванну, а также от типа матрицы. Показано, что наилучшее сочетание служебных и технологических свойств в наплавленном металле достигается при содержании в нем релита около 50 об. %.

*Ключевые слова:* плазменная наплавка, присадочный порошок, сферический релит, матрица, износостойкость, распределение карбидов, твердость, наплавочное оборудование

Для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, наиболее эффективными являются композиционные сплавы на основе литых карбидов вольфрама (далее релит) [1, 2]. Несмотря на высокую стоимость они нередко незаменимы, особенно в горноруднодобывающей отрасли. Композиционные сплавы успешно применяются для наплавки таких деталей, как замки буровых труб, шарошки буровых долот, зубья ковшевых экскаваторов и др. [3–5]. Срок службы деталей, наплавленных этими сплавами, в несколько раз выше, чем у наплавленных заэвтектическими сплавами типа высокохромистые чугуны.

В этой связи поиск эффективных способов наплавки композиционных сплавов, обеспечивающих наилучшее сочетание служебных свойств наплавленного металла, является весьма актуальным. Среди известных технологических процессов, применяемых для наплавки композиционных сплавов, следует выделить плазменно-порошковую наплавку (PTA-surfacing) [6].

Настоящая работа посвящена исследованию износостойкости наплавленного металла в зависимости от количества и формы армирующих частиц релита, способа их ввода в сварочную ванну, а также от типа сплава-связки (матрицы).

В экспериментах в качестве сплава-связки использовали порошки из сплавов на основе никеля и железа (табл. 1). Фракция порошков составляла 56...200 мкм. Выбор этих сплавов неслучайный. Самофлюсующиеся сплавы на основе никеля широко применяют для наплавки композиционных

материалов. Они характеризуются сравнительно низкой температурой плавления (1000...1100 °С), хорошей смачиваемостью зерен релита и достаточной износостойкостью. Для наших экспериментов выбраны сплавы, которые существенно отличаются друг от друга твердостью и пластичностью.

Сплав на основе железа указанного химического состава для этих целей предложен впервые. Он относится к классу высокованадиевых чугунов и сочетает в себе высокую износостойкость с пластичностью, необходимой для обеспечения сопротивления рабочего слоя ударным нагрузкам. Кроме того, он значительно дешевле сплавов на основе никеля.

В качестве армирующих материалов использовали порошки дробленого и сферического релита производства соответственно завода «Торезтвердосплав» и ИЭС им. Е. О. Патона. Размеры частиц этих порошков — 100...300 мкм.

Наплавку выполняли на образцах размером 60×100×20 мм из стали 20 плазматроном РР-6-02 на оборудовании фирмы «Плазма-мастер, Лтд.» (г. Киев). Сечение наплавленных валиков составляло 28×5 мм, производительность наплавки — 5 кг/ч.

Подачу матричного и армирующего порошков осуществляли двумя способами — в виде смеси и отдельно. В первом случае, чтобы исключить сепарацию, порошки смешивали путем слияния двух потоков, подаваемых из отдельных питателей непосредственно перед вводом в плазматрон; во втором — порошок матричного сплава подавали в дугу через фокусирующее сопло плазматрона в виде распределенного потока, а релит — непосредственно в сварочную ванну по специальному каналу (рис. 1). Такой способ подачи частиц релита

Таблица 1. Химический состав сплавов, использованных в качестве металла-связки

Тип сплава (матрица)	Содержание элементов, мас. %									Твердость
	C	Si	B	Ni	Fe	V	Mo	Cr	Cu	
Ni-Cr-Si-B	0,50	2,6	2,2	Основа	2,1	—	—	13,5	—	HRC 40
Ni-Cu-Si-B	0,15	1,1	1,0	То же	1,8	—	—	—	42,5	HB 200
Fe-Cr-V-Mo-C	2,20	0,6	—	2,7	Основа	7,8	2,5	18,2	—	HRC 44

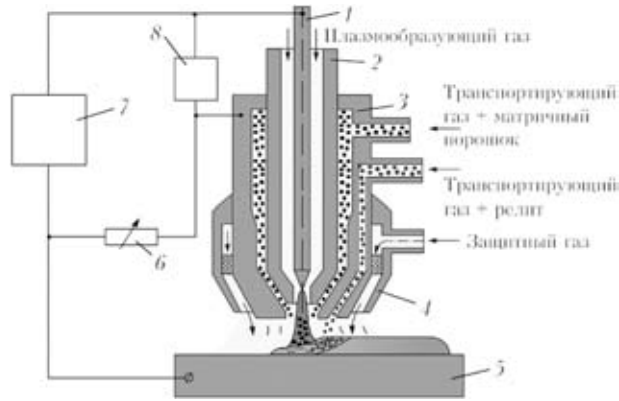


Рис. 1. Схема плазменно-порошковой наплавки композиционных сплавов с раздельной подачей матричного и армирующего материалов: 1 – электрод; 2, 3 – соответственно плазменное и фокусирующее сопло; 4 – защитное сопло; 5 – деталь; 6 – балластный реостат; 7 – источник питания; 8 – осциллятор

та в сварочную ванну максимально уменьшает тепловое воздействие на них дуги, предохраняя их тем самым от растворения. Особенно это важно при использовании в качестве матрицы сплавов на основе железа [2, 3].

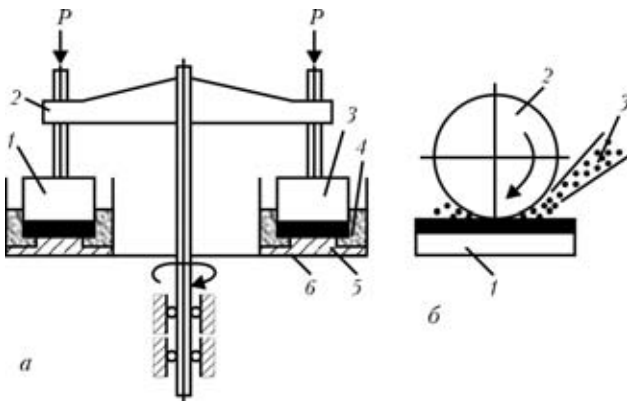


Рис. 2. Схема испытаний образцов на износостойкость по разным методикам: а – НК (1 – испытуемый образец; 2 – вращающаяся траверса; 3 – эталон; 4 – вода с абразивом; 5 – медное кольцо; 6 – сосуд); б – G-65 (1 – испытуемый образец; 2 – вращающийся резиновый диск; 3 – сухой кварцевый песок)

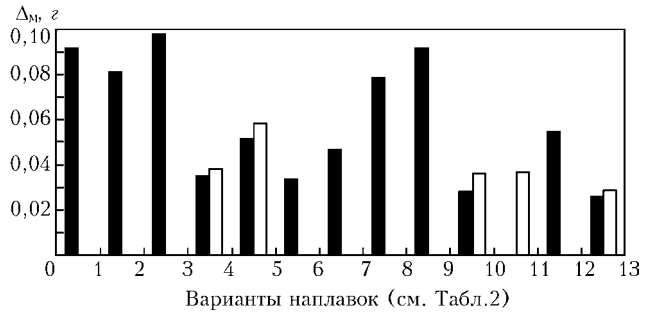


Рис. 3. Диаграмма износостойкости различных вариантов наплавки при испытаниях по методикам НК (■) и G-65 (□): Δм – потеря массы образцов

В табл. 2 представлены все опробованные варианты наплавки. Раздельный способ подачи использовали преимущественно для сферического релита как наиболее перспективного материала для этого способа.

Из наплавленных пластин вырезали образцы размером 16×6×16 мм для испытаний на износостойкость по методике НК («неподвижное кольцо») [7] и размером 76×25×12 мм для испытаний на износостойкость по стандартной методике ASTM G-65 (сухой песок–резиновый диск). Эти же образцы использовали также для металлографических исследований. Верхнюю часть слоя наплавленного металла шлифовывали до уровня, при котором зерна релита располагались относительно равномерно по сечению валика.

Первый тип образцов испытывали в ИЭС им. Е. О. Патона, второй – в исследовательской лаборатории Alberta Research Council Inc. (г. Эдмонтон, Канада). Во втором случае испытанию подвергали те варианты наплавки, в которых наблюдали наилучшее распределение карбидов. Данная методика предусматривает два этапа испытаний: первый – приработка (6000 оборотов резинового диска); второй – зачетный (6000 оборотов по приработанной поверхности). Схемы испытаний образцов представлены на рис. 2, результаты испытаний – на рис. 3.

Таблица 2. Варианты выполненных наплавки и оценка износостойкости

№ варианта наплавки	Тип сплава (матрицы)	Объемная доля релита, %	Способ подачи порошков		Форма частиц релита		Наличие трещин	Потеря массы образцов при испытаниях, г	
			Смесь	Раздельный	Сферическая	Осколочная		НК	G-65
1	Ni-Cu-Si-B	40	X		X		+	0,092	–
2	Тот же	40	X			X	+	0,081	–
3	»»	40		X	X		+	0,098	–
4	»»	50	X		X		–	0,035	0,038
5	»»	50	X			X	–	0,052	0,059
6	»»	50		X	X		+	0,034	–
7	»»	50		X		X	+	0,046	–
8	»»	60	X		X		+	0,079	–
9	»»	60	X			X	+	0,092	–
10	»»	55		X	X		–	0,028	0,036
11	Ni-Cu-Si-B	55		X	X		–	–	0,037
12	Fe-Cr-V-Mo-C	50	X		X		+	0,055	–
13	Тот же	55		X	X		–	0,026	0,029

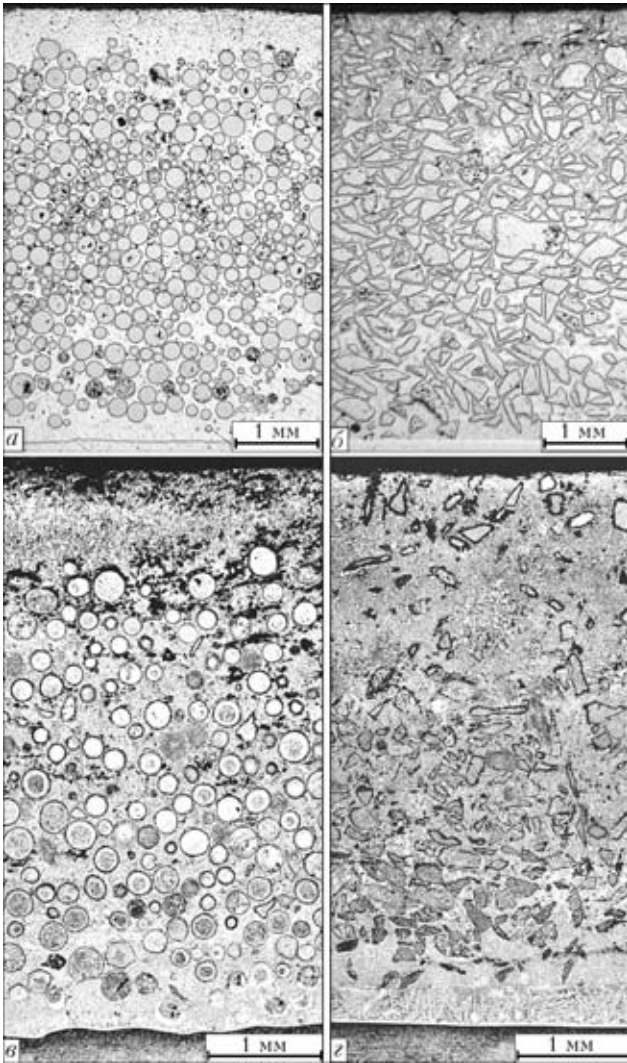


Рис. 4. Распределение сферического (а, в) и дробленого (б, з) релита в наплавленном металле при содержании его в смесях 50 об. % (а, б) и 60 об. % (в, з) (матрица — сплав Ni-Cr-Si-B)

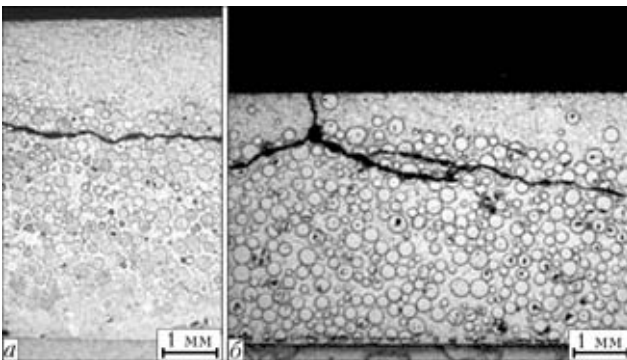


Рис. 5. Расположение трещин в слое металла с неполным заполнением релитом, наплавленном смесью (а) и с раздельной подачей порошков (б)

**Обсуждение результатов.** Наплавка смесью порошков. Наилучшие результаты достигнуты при содержании релита в смеси около 50 об. % (варианты наплавки 4, 5). Это относится как к сферическому, так и дробленому релиту независимо от типа матрицы. При этом имеет место хорошее формирование валиков и равномерное распределение частиц релита по его сечению (рис. 4, а, б), что в свою очередь обеспечивает максимальную

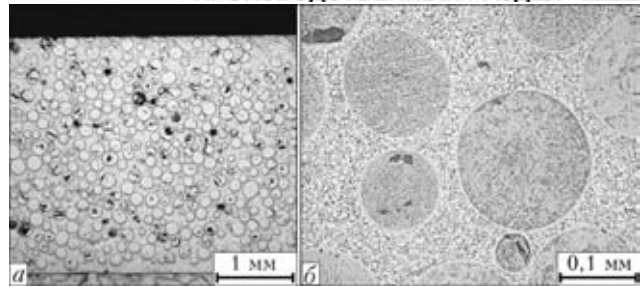


Рис. 6. Расположение зерен релита в матрице на основе железа при раздельной подаче порошков: а,  $\times 20$ ; б,  $\times 100$

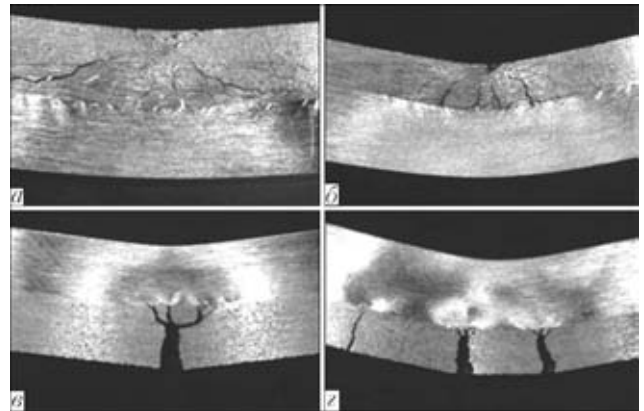


Рис. 7. Испытания образцов на изгиб, наплавленных с раздельной подачей сферического релита: а, в — матрица Ni-Cr-Si-B; б, г — матрица Fe-Cr-V-Mo-C

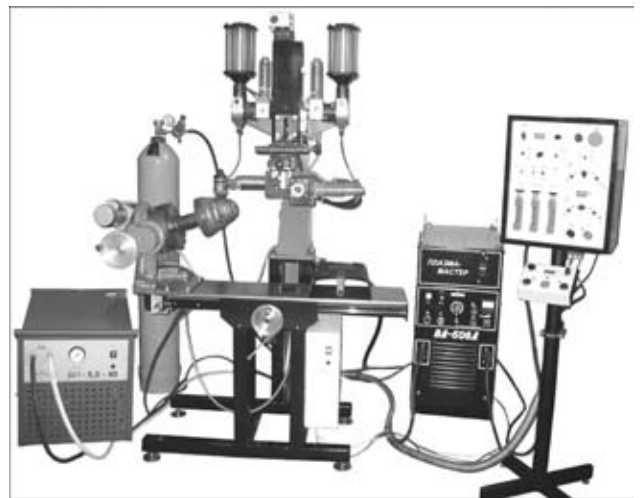


Рис. 8. Установка для плазменно-порошковой наплавки с раздельной подачей порошков ПМ-300С

износостойкость наплавленного металла (см. рис. 3). Если объемная доля релита в смеси больше, чем 50 об. % (варианты 8, 9), то для хорошего формирования валика необходимо существенно (на 40... 50 %) увеличивать ток наплавки, а значит, и тепловложение в деталь. Это вызвано недостаточным количеством легкоплавкой составляющей в смеси порошков (сплава-связки), что приводит к заметному растворению частиц, охрупчиванию матрицы и, как следствие, к снижению износостойкости наплавленного металла (см. рис. 3). В наплавленном металле остается не более 30 об. %

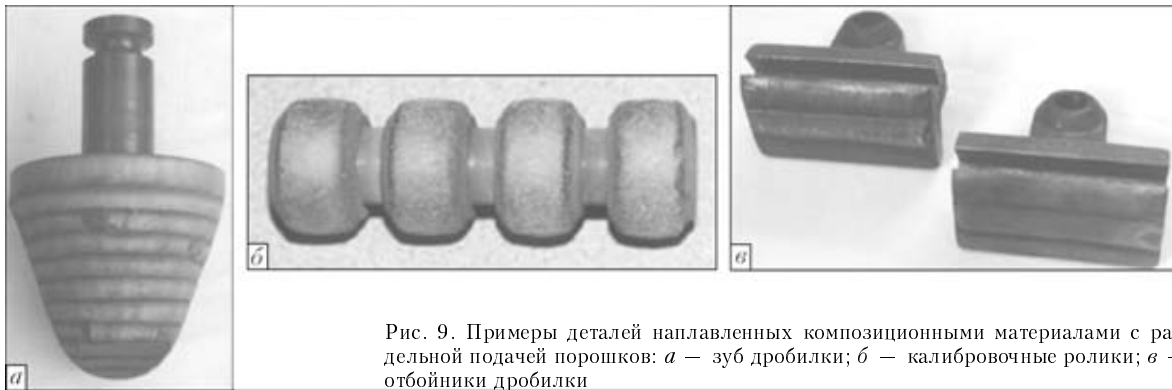


Рис. 9. Примеры деталей наплавленных композиционными материалами с раздельной подачей порошков: а — зуб дробилки; б — калибровочные ролики; в — отбойники дробилки

сферического (рис. 4, в) и не более 25 об. % дробленого релита (рис. 4, г).

В случае содержания релита в смеси менее 50 об. % (варианты 1, 2) он весь располагается в нижней части слоя наплавленного металла, оставив незаполненной его верхнюю часть. Естественно, износостойкость последней несмотря на дополнительное легирование углеродом и вольфрамом остается низкой (см. рис. 3). Результаты исследований распределения микротвердости матрицы по высоте слоя наплавленного металла и микрорентгеноспектрального анализа показали, что во всех случаях, хотя и в разной степени, имеет место растворение карбидов, причем оно более заметно в верхней части слоя наплавленного металла, а именно, в зоне действия плазменной дуги. Даже в вариантах наплавки 4 и 5 с 50 об. % релита микротвердость твердого раствора матрицы за счет легирования ее углеродом и вольфрамом возрастает от  $HV_{01}$  366 Па (у линии сплавления) до  $HV_{01}$  727 Па (в верхней ее части).

Микротвердость хорошо сохранившихся частиц сферического и дробленого релита в сплаве примерно одинакова и составляет, по данным, полученным в Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Германия),  $HV_{01}$  3900...3991 Па, а микротвердость полурастворившихся частиц находится в пределах  $HV_{01}$  2500...2650 Па.

Во всех исследованных вариантах наплавки присутствовали микротрещины в наплавленном металле. Наименьшее их количество наблюдали в вариантах 4 и 5, а наибольшее в вариантах 8, 9 и 12. В вариантах 1 и 2, где верхняя часть валиков не заполнена релитом, трещины располагались вдоль границы раздела слоев (рис. 5, а). При использовании сферического релита из-за высоких внутренних напряжений имели место также отколы наплавленного металла.

**Наплавка с раздельной подачей порошков.** Растворение релита при раздельной подаче матричного и армирующего материалов минимальное, даже в случае матрицы на основе железа (вариант 13, рис. 6, а). Это подтверждается данными микрорентгеноспектрального анализа и замерами микротвердости матриц. Микротвердость твердого раствора матрицы системы Ni-Cr-Si-B составляла  $HV_{01}$  360...420, а системы Fe-Cr-V-Mo-C —  $HV_{01}$  540...640. Валики имели хорошее формирование, трещины в слое наплавленного металла в большинстве случаев отсутствовали. Они появ-

лялись, как и при наплавке смесью, в тех случаях, когда имело место частичное заполнение объема валика карбидами (вариант 3, рис. 6, б).

Значение износостойкости наплавленного металла с матрицей системы Ni-Cr-Si-B при равномерном заполнении его релитом (вариант 10) немного выше того, которое получили при наплавке смесью (см. рис. 3). Износостойкость также выше и в случае использования более мягкой никелевой матрицы системы Ni-Cu-Si-B (вариант 11). Очевидно, твердость матрицы незначительно влияет на общую износостойкость слоя наплавленного металла, а это значит, что превалирующую роль при этих условиях изнашивания играют карбиды вольфрама. Нужно также отметить отсутствие трещин в слое наплавленного металла при использовании порошка системы Ni-Cu-Si-B, что делает его весьма перспективным материалом для этих целей.

При использовании в качестве матрицы сплава на основе железа, наплавленный металл имеет еще более высокую износостойкость (вариант 13, рис. 3). Однако следует отметить, что при наплавке с раздельной подачей порошков увеличиваются потери релита вследствие того, что часть его не попадает в сварочную ванну. Чтобы добиться равномерного заполнения слоя наплавленного металла релитом, нужно компенсировать потери релита увеличением его подачи по отношению к матричному порошку на 5...8 %.

В основном износостойкость композиционных слоев металла со сферическим релитом при прочих равных условиях значительно выше, чем с дробленым, вопреки выводам работы [8]. Сферический релит меньше растворяется в сварочной ванне и очень удобен для плазменно-порошковой наплавки, поскольку имеет более высокую текучесть и не влияет изнашивание оборудования.

Испытания наплавленных образцов на изгиб с приложением нагрузки как со стороны наплавленного (рис. 7, а, б), так и со стороны основного металлов (рис. 7, в, г) показали, что слой наплавленного металла имеет хорошую адгезию к основному металлу и не отслаивается. Это справедливо как для матрицы на основе никеля, так и на основе железа.

На рис. 8 приведено оборудование для плазменно-порошковой наплавки композиционными сплавами, а на рис. 9 показаны детали, наплавленные указанными материалами с раздельной подачей порошков.

**Выводы**

1. Наилучшее сочетание служебных и технологических свойств металла как при наплавки смесью, так при раздельной подаче порошков достигается при содержании в нем релита около 50 об. %.

2. В случае раздельной подачи порошков растворимость сферического и дробленого релитов ниже, чем при наплавке смесью.

3. При наплавке смесью порошков для избежания трещин и отколов наплавленного металла следует применять более пластичную и более нейтральную к растворению карбидов матрицу, например сплав системы легирования Ni-Cu-Si-W.

4. В случае раздельной подачи матричного и армирующего порошков можно успешно применять в качестве матрицы сплавы на основе железа.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук М. Юмштыку за помощь в проведении испытаний образцов в Канаде.

1. *Особенности* газообразного износа композиционных сплавов / Ю. А. Юзвенко, А. П. Жудра, Е. И. Фруммин, В. А. Гавриш // Автомат. сварка. — 1972. — № 8. — С. 35–35.

2. *Жудра А. П., Белый А. И.* Новые композиционные сплавы и результаты исследования их свойств // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 151–157.

3. *Ткаченко М. Е., Подугольников А. И.* Разработка и промышленное внедрение композиционного сплава на основе релита для армирования шарошек буровых долот // Наплавка износостойких и жаростойких сталей и сплавов. Наплавочные материалы. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 17–20.

4. *Наплавка и армирование зубьев ковшей экскаваторов износостойким композиционным сплавом* / Д. А. Дудко, И. В. Нетеса, П. В. Мазненко, В. И. Зеленин // Свароч. пр-во. — 1977. — № 6. — С. 16–18.

5. *Эффективность* наплавки композиционными сплавами деталей, работающих в резиновых смесях / Д. А. Дудко, Б. И. Максимова, И. В. Нетеса и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 4. — С. 71.

6. *Boaifi B., Reichmann B.* New areas of application through the development of the high-productivity plasma-arc powder surfacing process // Welding and Cutting. — 1998. — 50, № 12. — P. 236e–237e.

7. *Юзвенко Ю. А., Гавриш В. А., Марьенко В. Ю.* Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 23–27.

8. *Plasma transferred arc overlays reduce operating costs in oil sand processing* / D. Harper, M. Gill, K. W. D Hart, M. Anderson // YTSC 2002. Intern. spray conf., Essen, Germany, May 2002. — Essen, 2002. — P. 278–283.

Wear resistance of deposited metal depending upon the quantity and shape of the reinforcing tungsten carbide particles, methods for their addition to the weld pool and type of matrix has been investigated. It is shown that the best combination of service and technological properties of the deposited metal are achieved at its carbide content of about 50 vol. %.

Поступила в редакцию 15.09.2004

### **Научно-производственный центр «Титан» ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины**

*Сплавы на основе титана благодаря высокой удельной прочности и другим уникальным свойствам нашли широкое применение в аэрокосмической технике, самолетостроении, судостроении, химическом машиностроении, энергетике и других областях промышленности. Основным сырьем для изготовления титановых сплавов является губчатый титан, который производится на Запорожском титано-магниево-комбинате из ильменитовых руд. Украина занимает третье место в мире по запасам этих руд, причем самого высокого качества.*

*Для разработок сплавов на основе титана, оборудования и технологий их получения из губчатого титана в 1996 г. в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины был создан Научно-производственный центр «Титан». Производство слитков осуществляется методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) на отечественном оборудовании производительностью 3000 т в год. При этом впервые в мире:*

- ✓ способ ЭЛПЕ использован для получения высоколегированных сплавов титана;
- ✓ создана и внедрена в производство технология выплавки слитков из недробленных блоков губчатого титана;
- ✓ освоена выплавка полых слитков для производства крупногабаритных титановых труб;
- ✓ созданы оборудование и технология оплавления боковой поверхности слитков, успешно применяемые вместо их механической обработки.

*В настоящее время Научно-производственным центром «Титан» ИЭС им. Е.О. Патона установлены кооперационные связи со специализированными предприятиями Украины, что позволяет производить различный сортамент полуфабрикатов из титана (поковки, прутки, трубы) как для нужд промышленности Украины, так и на экспорт.*

НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины  
03028, ул. Ракетная, 26, Киев, Украина  
Тел.: (38044) 264-9543  
Факс: (38044) 264-1096