



УДК 621.791.92.04:624.21

# РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОДНОКАТКОВЫХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАПЛАВКИ

**В. К. КАЛЕНСКИЙ**, канд. техн. наук, **В. И. ДВОРЕЦКИЙ**, д-р техн. наук, **В. М. БУГА**,  
**А. В. СЕМЕНИХИН**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработаны порошковые проволоки для наплавки под флюсом рабочих поверхностей катков и плит однокатковых опорных частей (ОКОЧ) мостов слоем высокопрочной стали марки 30X13MН, стойкой против атмосферной коррозии. Технология изготовления ОКОЧ с применением наплавки позволяет повысить их долговечность в три раза и уравнивать ее со сроком службы моста. Промышленное производство ОКОЧ организовано на предприятиях ИЭС им. Е. О. Патона.

*Ключевые слова:* наплавка, материалы, мосты, однокатковые опорные части, коррозионно-стойкие высокопрочные контактные поверхности, технология, производство

Согласно данным отечественной и зарубежной статистики, средний срок службы мостов составляет около 100 лет, а их опорных частей (ОЧ) — не превышает 30 лет. Последние приходится заменять не менее трех раз, что является дорогостоящей, а с учетом огромной массы мостовых пролетов, и чрезвычайно трудоемкой операцией.

До сих пор при строительстве большепролетных мостов применялись в основном многокатковые ОЧ, для которых не гарантировались коэффициент трения качения, технологическая прочность, твердость и коррозионная стойкость контактных поверхностей. В результате при длительной эксплуатации изменялся характер опирания пролетных строений на ОЧ, подвижные ОЧ заклинивали, менялась расчетная схема сооружения, появлялись дефекты на опорах и в пролетах.

Простейшими по конструкции и самыми современными по функциональной способности являются однокатковые опорные части (ОКОЧ), состоящие из двух опорных плит и катка между ними (рис. 1). Однако применение ОКОЧ в СНГ ограничивалось из-за низкой несущей способности углеродистых и низколегированных сталей, рекомендуемых СНиП 2.05.03–84 для их изготовления.

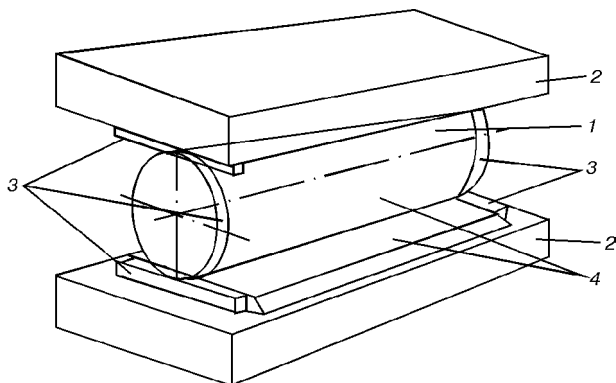


Рис. 1. Схема ОКОЧ: 1 — каток; 2 — опорные плиты; 3 — противоугольные устройства; 4 — рабочие поверхности качения  
© В. К. Каленский, В. И. Дворецкий, В. М. Буга, А. В. Семенихин, 2001

В основу данной разработки положена идея получения рабочих контактных поверхностей ОКОЧ при помощи наплавки высокопрочной стали, обеспечивающей высокие значения твердости и имеющей достаточную стойкость против атмосферной коррозии. Применение таких ОКОЧ, отличающихся высокой надежностью, низким коэффициентом трения, малой металлоемкостью и минимально возможной строительной высотой, позволит увеличить срок их службы примерно в три раза и уравнивать его со сроком эксплуатации моста.

Эта идея впервые была реализована в Германии, где заготовки катков и плит ОКОЧ из низкоугле-

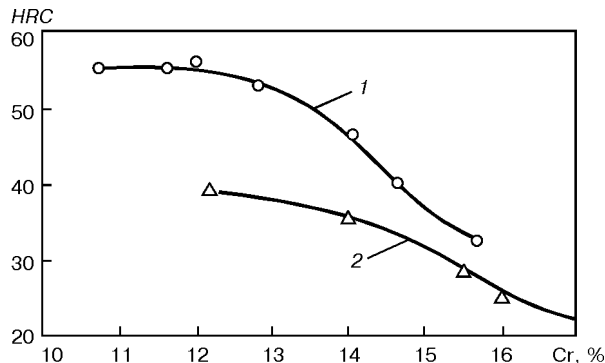


Рис. 2. Влияние хрома на твердость сталей: 1 — наплавленный металл (0,3 % С); 2 — закаленный прокат (0,1 % С)

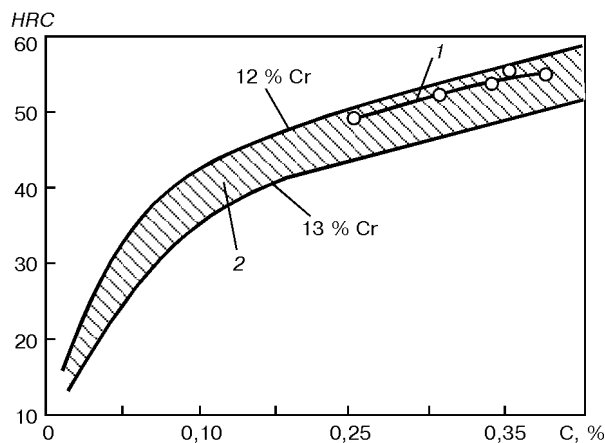


Рис. 3. Влияние углерода на твердость хромистых сталей: 1 — наплавленный металл; 2 — закаленный прокат

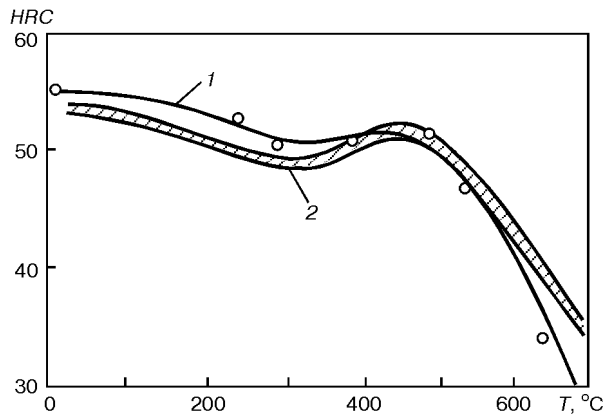


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на твердость хромистых сталей: 1 — наплавленный металл 30X13МН; 2 — прокат из стали 30X13

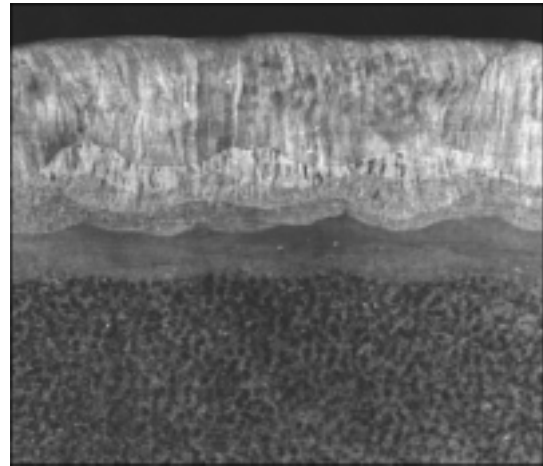


Рис. 5. Макроструктура наплавленного образца

родистой стали наплавляли в аргоне электродными проволоками, содержащими 12... 17 % хрома [1].

При разработке отечественного варианта технологии было решено изготавливать заготовки ОКОЧ из стали 09Г2С, а наплавку выполнять под флюсом порошковыми проволоками из хромистых сталей двумя слоями: пластичным — промежуточным и высокопрочным — рабочим.

Чтобы свести к минимуму выгорание легирующих элементов при наплавке, использовали малоактивный низкремнистый флюс АН-72 [2], обеспечивающий хорошее формирование наплавленного валиков и отличную отделимость шлаковой корки. Опыты по наплавке осуществляли на аппарате А-874Н с независимой подачей проволоки на постоянном токе при обратной полярности. Использовали источник питания с жесткой внешней характеристикой. Режим наплавки следующий:  $I = 300... 380$  А,  $U = 30... 32$  В,  $v_n = 30$  м/ч.

Промежуточный слой наплавляли в три прохода опытной порошковой проволокой 07Х15 на узкие грани пластин размером 90×300×400 мм, подогретых до 280 °С. Твердость наплавленного металла составила  $HRC 25$ , а ударная вязкость — 27 Дж/см<sup>2</sup>.

Задача заключалась в том, чтобы создать порошковую проволоку для наплавки коррозионно-стойкого рабочего слоя, имеющего высокую твердость ( $HRC 48... 52$ ) и прочность ( $\sigma_T = 1200... 1500$  МПа). Такие показатели обеспечивают мартенситные хромистые стали, закаливающиеся на воздухе [3, 4]. Для уточнения характера влияния хрома и углерода на твердость наплавленного металла изготовили серию опытных порошковых проволок с 11... 16 % Cr и 0,1... 0,4 % C и выполнили их наплавку. Согласно результатам измерений твердости (рис. 2 и 3), за основу состава рабочего слоя был принят наплавленный металл типа 30X13.

Стали этого типа склонны к образованию трещин при закалке, сварке и наплавке [5, 6]. Поэтому методом математического планирования экспериментов проведена оптимизация химического состава рабочего слоя, в ходе которой оценивали два его критерия: твердость и трещиностойкость. Были изготовлены порошковые проволоки, обеспечивающие получение наплавленного металла в пределах заданных планом составов, %: 0,15... 0,30 C; 11... 15 Cr; 0,2... 0,5 Ni; 0... 0,2 Ti; при 0,45 Mn, 0,5 Si и 1,0 Mo.

Для определения твердости и трещиностойкости на промежуточный слой из стали 07Х15 на узкие грани указанных пластин наплавляли валики в два прохода по ширине и в пять проходов по высоте. Трещиностойкость оценивали по 12-балльной системе визуально (в зависимости от количества и протяженности трещин). В результате поиска оптимального состава на ЭВМ был получен глобальный экстремум состава наплавленного металла, содержащего (%) 0,24 C, 12,5 Cr, 0,35 Ni, 0,018 Ti при 0,45 Mn, 0,5 Si и 1,0 Mo и обеспечивающего твердость примерно  $HRC 50$  при полном отсутствии трещин. Полученные данные позволили разработать порошковую проволоку марки ПП-АН 165 (ПП-Нп-30X13МН), обеспечивающую получение наплавленного металла, состав которого близок к оптимизированному. Проволока для наплавки промежуточного (буферного) слоя получила обозначение ПП-АН 166 (ПП-Нп-07Х15). Упомянутые проволоки были изготовлены и использованы для последующих опытов.

Наплавку выполняли на указанном режиме в шесть проходов (по три проволоками марки ПП-Нп-07Х15 и марки ПП-Нп-30X13МН) под флюсом АН-72. Из рабочего слоя вырезали образцы для исследований. Химический состав рабочего слоя сле-

Таблица 1. Механические свойства наплавленного металла 30X13МН в зависимости от температуры отпуска

Температура отпуска, °С	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Твердость HRC верхнего слоя
300	17	1292	1397	2,6	5,9	48
350	30	1301	1336	5,3	23,3	48
400	41	1364	1463	5,8	16,0	49
490	12	1186	1366	4,0	8,0	49

Таблица 2. Твердость *HRC* наплавленного металла

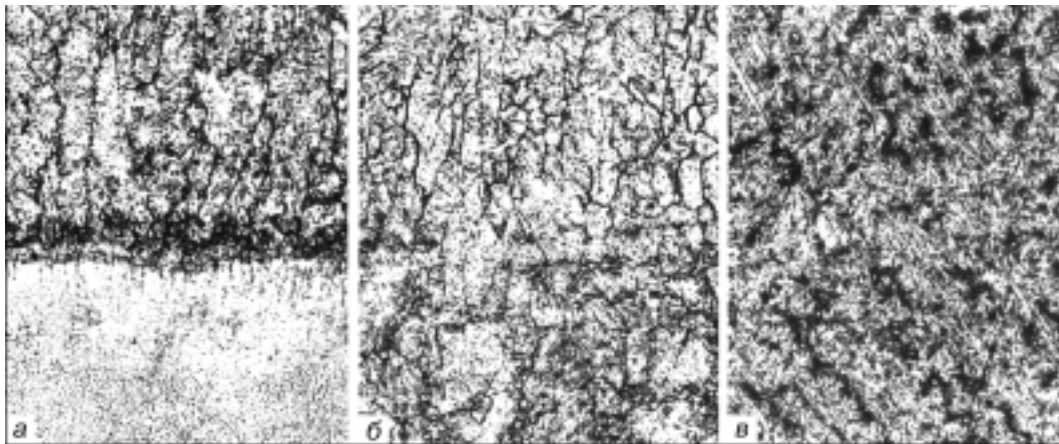
Наплавленный металл	Расстояние от поверхности, мм	Исходное состояние после наплавки	После отпуска при 400 °С
30X13МН	1	50	50
	2	50	50
	3	51	49
	4	49	49
	5	48	48
	6	45	45
	7	45	44
Зона сплавления	8	37	37
	9	30	30
07X15	10	28	26
	11	27	26
	12	26	25

Таблица 3. Скорость общей коррозии образцов, мм/год

Исследуемый металл	Камера соляного тумана	Камера влажности	Камера SO <sub>2</sub>
30X13МН	0,033	0,0015	0,0011
20X13	0,348	0,0078	0,0168
40X13	0,200	0,0075	0,0165
Сталь 45	1,280	0,2860	0,4300

Таблица 4. Значения коррозионных потенциалов наплавленного и основного металлов

Исследуемый металл	Значение потенциала $E_k$ , мВ
09Г2С	-580
07X15	-370
30X13МН	-390
08X18Н10Т	-240

Рис. 6. Микроструктура (уменьш. 4/5) наплавленного образца: *а* — граница сплавления с основным металлом (×200); *б* — граница сплавления 07X15 и 30X13МН (×200); *в* — наплавленный металл 30X13МН (×400)

дующий, %: 0,26 С; 0,59 Si; 0,46 Mn; 12,53 Cr; 0,52 Ni; 0,81 Mo; 0,015 Ti; 0,016 S; 0,018 P.

Часть образцов подвергли отпуску в интервале температур 250... 650 °С. Длительность отпуска составляла 1 ч, охлаждение с печью. Результаты измерения твердости отпущенных образцов приведены на рис. 4, из которого видно, что наплавленный металл отличается повышенной устойчивостью против снижения твердости. При 500 °С зафиксировано небольшое вторичное повышение твердости вследствие выделения специальных карбидов. Для сравнения на графике показана твердость близкой по составу катаной стали.

Результаты механических испытаний металла рабочего слоя приведены в табл. 1. Из нее следует, что наилучших показателей твердости, ударной вязкости, прочности и пластичности наплавленный металл достигает после отпуска при 400 °С.

На рис. 5 приведен макрошлиф наплавленного образца. Структура металла, особенно трех верхних проходов, имеет выраженный транскристаллитный характер. Какие-либо дефекты в металле наплавленного слоя и ЗТВ не обнаружены. Распределение твердости по толщине наплавленного слоя показано в табл. 2.

Микроструктура наплавленного металла приведена на рис. 6. Зона сплавления наплавленного металла 07X15 с основным (рис. 6, *а*) характеризуется повышенной травимостью вследствие скопления в ней мелкодисперсных карбидов, образующих карбидную гряду вдоль границы сплавления. Со сто-

роны основного металла к границе примыкает обезуглероженная полоска феррита, а ниже видна мелкозернистая ферритно-перлитная структура. Структура наплавленного металла 07X15 у границы сплавления — ферритная с мелкодисперсными выделениями карбида хрома.

На рис. 6, *б* показана граница сплавления наплавленных металлов 07X15 и 30X13МН. Структура 07X15 (низ) состоит из ферритной матрицы с дисперсными карбидами хрома и перистыми выделениями сорбита, а 30X13МН (верх) — из мартенсита отпуска,  $\delta$ -феррита и дисперсных выделений карбидов.

Во втором и третьем проходах наплавленного металла 30X13МН (рис. 6, *в*) количество участков  $\delta$ -феррита уменьшается, а содержание мартенсита увеличивается. Максимальная микротвердость ( $HV$  0,5... 4410 МПа) характерна для верхнего слоя наплавки.

Стойкость наплавленного металла 30X13МН против общей коррозии в атмосферных условиях оценивали в сравнении со стойкостью проката из сталей 20X13, 40X13 и стали 45\*. Для исследования образцы размером 2×10×60 мм подвешивали в камерах соляного тумана (аэрозоль из 3%-го раствора NaCl в воде), повышенной влажности и с сернистым газом. Испытания проводили круглосуточно в течение 1000 ч при температуре 35... 40 °С с заменой среды через 15 сут. Из табл. 3 следует, что напла-

\*Работу по изучению коррозионной стойкости наплавленного металла выполнили Г. Е. Боева, Е. П. Лось, В. А. Горбань.

**Таблица 5. Стойкость наплавленного металла против коррозионного растрескивания после отпуска**

Температура отпуска, °С	Нагрузка, кН	Время до разрушения, ч
300	5,0	595,0
	7,5	14,5
350	5,0	>1000,0
	7,5	>1000,0
400	5,0	>1000,0
	7,5	>1000,0
400	5,0	>1000,0
	7,5	860,0

ленный металл 30X13МН во всех трех камерах корродировал намного медленнее, чем остальные. Согласно 10-балльной шкале коррозионной стойкости (ГОСТ 13819–86) наплавленный металл можно отнести к «весьма стойким».

Для оценки вероятности протекания электрохимической коррозии в зоне сплавления наплавленного металла с основным были проведены измерения потенциалов этих металлов, которые осуществляли по методике ускоренного определения электрохимической гетерогенности металла под каплей электролита из 3%-го раствора NaCl [7]. Замеры потенциалов производили на образцах размером 3X10X60 мм, вырезанных перпендикулярно наплавленной поверхности. Результаты измерений представлены в табл. 4. Для сравнения в ней приведен также коррозионный потенциал стали 08X18Н10Т.

Из таблицы видно, что разность потенциалов металлов 09Г2С и 07Х15 равняется –210 мВ, 09Г2С и 30Х13МН составляет –190 мВ. В случае образования дефектов в зоне сплавления такая разность потенциалов может стать причиной прогрессирующей коррозии. Поэтому зоны сплавления основного и наплавленного металлов следует покрывать долговечными ингибиторами.

Определение склонности наплавленного металла 30X13МН к коррозионному растрескиванию проводили в колесе переменного смачивания в 3%-м растворе NaCl по ГОСТ 26294–84. Испытывали образцы размером 2X10X120 мм, вырезанные из верхнего слоя, наплавленные на оптимальном режиме и отпущенные при 300, 350, 400 и 490 °С. Их устанавливали в скобах и нагружали по четырехточечной схеме усилием 5,0 и 7,5 кН. Результаты испытаний приведены в табл. 5. Из таблицы следует, что при температуре отпуска 400 °С обеспечиваются хорошие показатели.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили правильность выбора наплавочных материалов, режимов наплавки и термической обработки.

Технологическая схема изготовления катков и плит ОКОЧ выглядит следующим образом.

Предварительно обработанные заготовки катков и плит, размеры которых зависят от нагрузки на ОКОЧ, нагревают до 200... 220 °С. Наплавку промежуточного слоя осуществляют проволокой ПП-Нп-07Х15 под флюсом АН-72 в 2...3 прохода по высоте продольными валиками с челночным перемещением сварочной головки. Для наплавки рабо-

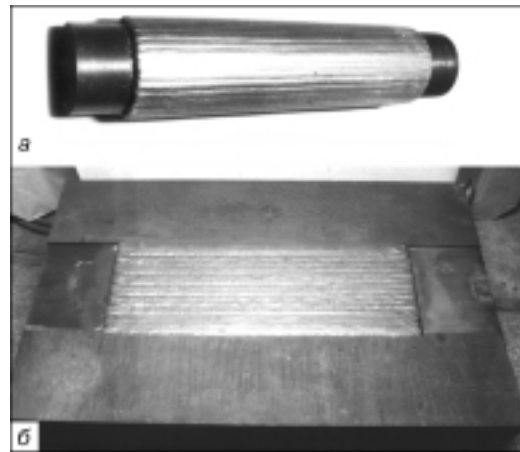


Рис. 7. Заготовки ОКОЧ после наплавки: а — каток диаметром 212 мм; б — плита

чего слоя заготовки подогревают до 250... 300 °С. Наплавку выполняют, как правило, в три прохода по высоте проволокой ПП-Нп-30Х13МН. Режим наплавки указан выше.

Затем заготовки подвергают отпуску при 390... 410 °С в течение 1 ч с охлаждением в печи. После остывания до 200 °С возможно их дальнейшее охлаждение на воздухе.

Наплавленные и отпущенные заготовки для изготовления ОКОЧ под вертикальную нагрузку 13 кН показаны на рис. 7.

Далее производят механическую обработку заготовок по чертежу. Толщина наплавленного слоя после механической обработки должна составлять не менее 0,1R – 2,0 мм (R — радиус катка).

Контроль качества осуществляют после шлифовки наплавленных поверхностей катков и плит методами ультразвуковой и магнитопорошковой дефектоскопии. Трещины не допускаются. Наличие пор и шлаковых включений не должно превышать установленных норм.

Готовые наплавленные катки и плиты считаются качественными, если твердость контактных поверхностей составляет HRC 48... 53, а на глубине 0,04R от контактных поверхностей — не менее HRC 45.

Для проверки разработанных материалов, технологии и конструкции были изготовлены опытные ОКОЧ с диаметром катка 90 мм. Их установили для испытаний в пролетном строении экспериментального кольца ВНИИЖТ. Систематическое наб-

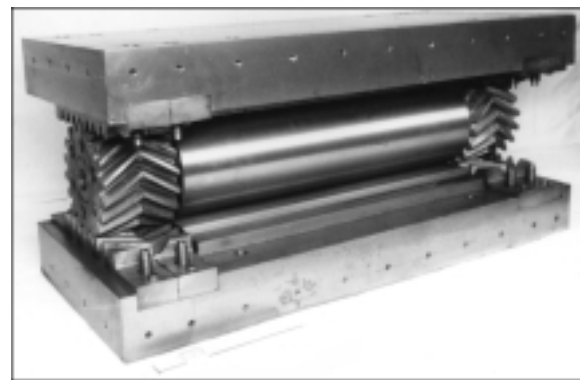


Рис. 8. Одна из готовых ОКОЧ, установленных под пролеты моста через р. Урал



людение не зафиксировало в них каких-либо дефектов, что позволило сделать вывод о правильности разработанного технического решения и приступить к производству ОКОЧ с катками диаметром 212... 250 мм.

Однокатковые опорные части с наплавленными по описанной технологии рабочими поверхностями были изготовлены и установлены под пролетные строения сооружений следующих объектов:

Южного мостового перехода через р. Днепр в г. Киеве;

автодорожного моста через р. Чусовую у г. Перми;

первых двух мостов через реки Малая и Большая Каюковка мостового перехода через Большую Волгу у г. Саратова;

автодорожного моста через р. Урал в г. Уральске (рис. 8).

Flux-cored wires for submerged-arc surfacing of working surfaces of rollers and plates of one-roller supporting parts (ORSP) of bridges with a layer of high-strength steel of the 30Kh13MN grade, which is resistant to atmospheric corrosion, have been developed. The technology of manufacture of ORSP using surfacing allows their life to be extended 3 times to make it equal to the life of the bridge. Plants of the E.O.Paton Electric Welding Institute manufacture ORSP on the commercial scale.

В настоящее время производство ОКОЧ организовано на предприятиях Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

1. *Packeiser W.* Auftragschweissen von Brueckenlagern mit Chromstal // *Industrie-Anzeiger*. — 1973. — № 23. — S. 452–482.
2. *Буга В. М.* Низкокремнистый флюс для дуговой и электрошлаковой наплавки // *Автомат. сварка*. — 1980. — № 6. — С. 58–61.
3. *Гудремон Э.* Специальные стали. — М.: Металлургиздат, 1959. — Т. 1. — 496 с.
4. *Гуляев А. А.* Металловедение. — М.: Оборонгиз, 1963. — 464 с.
5. *Каховский Н. И.* Сварка высоколегированных сталей. — Киев: Техніка, 1975. — 375 с.
6. *Фрумш И. И.* Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
7. *Эванс Ю. Р.* Коррозия и окисление металлов. — М.: Машгиз, 1962. — 856 с.

Поступила в редакцию 23.06.2000,  
в окончательном варианте 20.07.2000



## СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ— 2001

### МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

24–28 сентября 2001

Россия, Волгоград

#### Тематика

- ✧ физико-химические основы соединения разнородных материалов
- ✧ математическое моделирование и механика композиционных материалов
- ✧ автоматизированные методы проектирования композиционных материалов, узлов
- ✧ структура и свойства слоистых композиционных материалов
- ✧ технология получения слоистых композиционных материалов
- ✧ технологическое оборудование и методы контроля

Тел.: (8442) 34 99 41, 34 06 42, 34 16 00.  
факс: (8442) 34 99 41,  
E-mail: lysak@vstu.ru, weld@vstu.ru