



## СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены данные о современном производстве и потреблении стали в различных регионах мира. В связи с прогрессом в машиностроении, судостроении, строительстве и других отраслях потребуется снижение массы сварных конструкций, повышение их надежности и долговечности, снижение энергоемкости сварочных работ. Указанные задачи можно решить путем использования в ответственных конструкциях высокопрочных низколегированных (ВПНЛ) сталей. Приведены данные о состоянии металлургии и технологии сварки ВПНЛ сталей в России и Украине. Рассмотрены проблемы сварки ВПНЛ сталей и тенденции их развития, сформулированы направления дальнейших исследований. Рассмотрено состояние разработки сварочных материалов общего назначения, даны рекомендации по их совершенствованию.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварочные материалы, высокопрочные низколегированные стали

Минувший XX век был веком становления и развития сварки. За истекшее время создано много новых сварочных процессов — от сварки угольным и металлическим электродом до электронно-лучевой, лазерной, гибридной лазерно-дуговой сварки. Тем не менее, среди многочисленных способов сварки плавлением до сих пор преобладает дуговая сварка. Очень широк диапазон свариваемых материалов — низкоуглеродистые и легированные стали, сплавы на основе титана, алюминия, молибдена, вольфрама, интерметаллиды и керамические материалы. Специалисты всего мира с полным основанием утверждают, что сталь как конструкционный материал будет доминировать еще по крайней мере в первой четверти XXI века.

Производство стали в мире непрерывно растет и развивается (рис. 1), в 2000 г. оно составило около 830 млн т [1]. За первые семь месяцев 2002 г. в мире было выпущено более 505 млн т стали. По данным Международного института стали, потребление этого материала вскоре увеличится на 4,3 %. Особо быстрыми темпами растет выпуск стали в Азии. На долю стран этого региона в 2000 г. приходилось 42 % производства стали (рис. 1) и 40,6 % ее потребления (рис. 2).

КНР последние шесть лет занимает лидирующее место в производстве стали. В 2001 г. она выпустила 151,6 млн т стали (это 18 % мирового

рынка) [2]. Начиная с 1996 г. производство стали в КНР увеличилось более чем на 50 %.

В 2000 г. выпуск стали в России составил 58 млн т, в Украине — 31 млн т, т. е. сократился по сравнению с 1990 г. практически в 2 раза. Из-за развала в области машиностроения и строительства потребление стали в этих странах уменьшилось в несколько раз, что вызвало сокращение производства сварочных материалов. В 2000 г. в России, Украине и других странах СНГ было произведено всего 343 тыс. т сварочных материалов. Из них на долю покрытых электродов приходилось 80 %, проволоки сплошного сечения для сварки в защитных газах — 9,7 %, порошковых проволок — 1,6 %, флюсов — 8,7 % [3]. Наиболее резко снизился выпуск материалов для механизированной сварки. Большинство крупных специализированных производств вынуждены работать с хронической недогрузкой мощностей. Значительно возросли цены на сырье и энергоносители. Выпускаются устаревшие марки материалов, отсутствует необходимый маркетинг продукции. В таких условиях многие специализированные производства приходят в упадок, при этом появляется множество мелких фирм, которые выпускают дешевые и зачастую некачественные сварочные материалы.

Представляется, что это явление временное. В нынешних условиях только крупные узкоспециализированные производства, которые должны развиваться в тесном сотрудничестве с научными организациями, способны предложить конкуренто-



Рис. 1. Производство стали в мире в 2000 г.



Рис. 2. Потребление стали в мире в 1998 г.

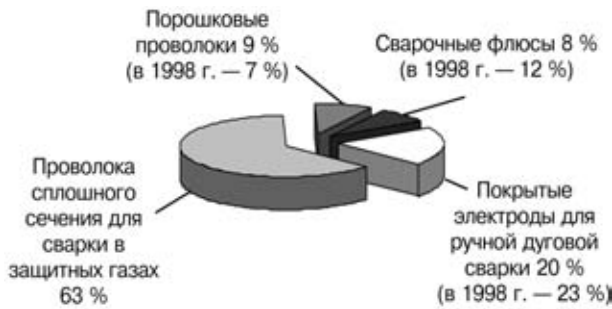


Рис. 3. Доля выпуска сварочных материалов в странах ЕС в 2000 г.

способную продукцию. Прогнозируя развитие дуговой сварки в нашем государстве, мы, несомненно, должны ориентироваться на промышленно развитые страны.

На рис. 3 и 4 приведены данные о выпуске сварочных материалов различного типа в странах ЕС и Японии [1, 4], на рис. 5 [1] — результаты оценки доли металла, наплавленного различными способами дуговой сварки в странах ЕС, на рис. 6 — данные о выпуске покрытых электродов для ручной дуговой сварки различного назначения [5].

В промышленно развитых странах расширяется объем применения механизированной сварки в защитных газах сплошной и порошковой проволоками и сокращается доля ручной дуговой сварки.

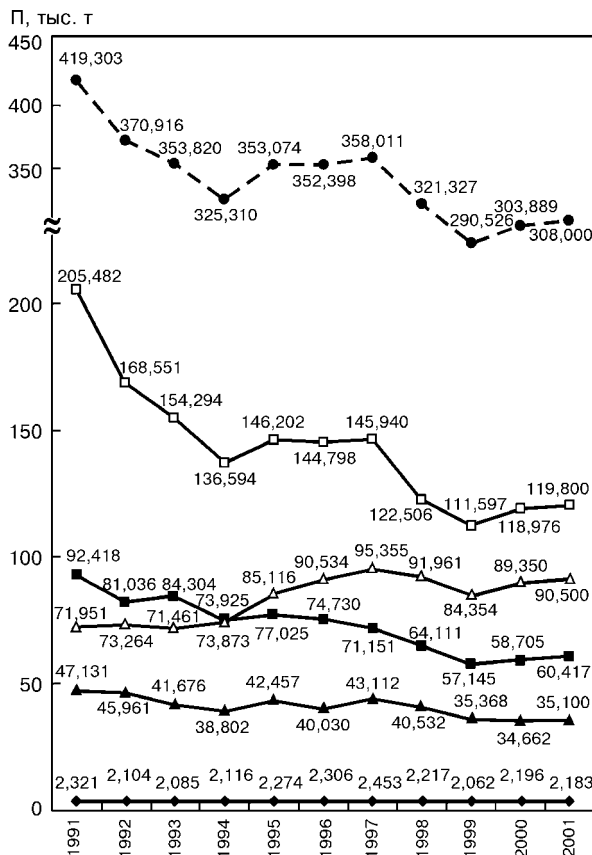


Рис. 4. Производство сварочных материалов (П) в Японии за период с 1991 по 2001 г.г.: □ — сплошная проволока для сварки в защитных газах; △ — порошковая проволока; ▲ — покрытые электроды; ▲ — материалы (проволока и флюс) для сварки под флюсом; ◆ — неплавящиеся электроды и материалы для других процессов сварки; ● — всего

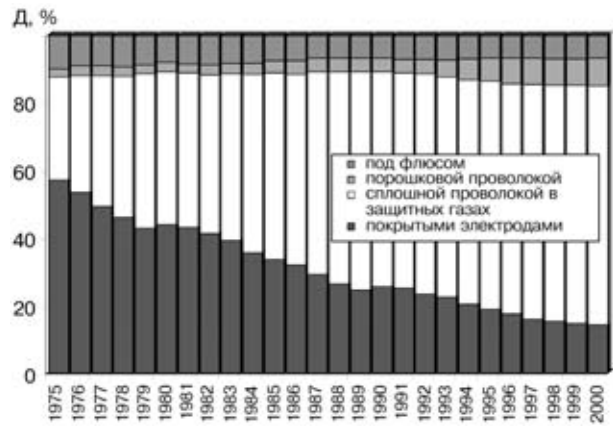


Рис. 5. Доля (Д) металла, наплавленного различными способами дуговой сварки в странах ЕС за 1975–2000 гг.

Например, в странах с развитым судостроением (Япония, Корея) увеличивается объем применения порошковой проволоки. В странах ЕС из механизированных способов доминирует сварка в смесях газов на основе аргона и углекислом газе проволокой сплошного сечения. Высокая доля применения покрытых электродов характерна для развивающихся стран с дешевой рабочей силой. Доля сварки под флюсом в странах ЕС с 1990-х гг. по настоящее время стабилизировалась (рис. 5).

Сложившаяся в России и Украине ситуация в области применения сварочных материалов, несомненно, будет изменяться. Прогресс в машиностроении, судостроении, строительстве, нефтехимическом и нефтеперерабатывающем комплексе и других отраслях промышленности, а также оплата труда сварщика и социальные проблемы требуют новых решений.

В настоящее время к сварным конструкциям предъявляются следующие требования: снижение их массы и энергоемкости при изготовлении, повышение надежности и долговечности. Прогресс в данном направлении связан с дальнейшим расширением применения высокопрочных низколегированных (ВНЛ) сталей, которые являются важной разработкой второй половины XX века. В 1994 г. мировое производство ВНЛ сталей достигло порядка 80 млн т при ежегодном темпе роста производства в 5 % и более [6]. Сейчас доля производства этого материала еще более возросла.

Многие годы в СССР проводились работы по созданию ВНЛ сталей и технологий их сварки. В ЦНИИКМ «Прометей» при сотрудничестве с

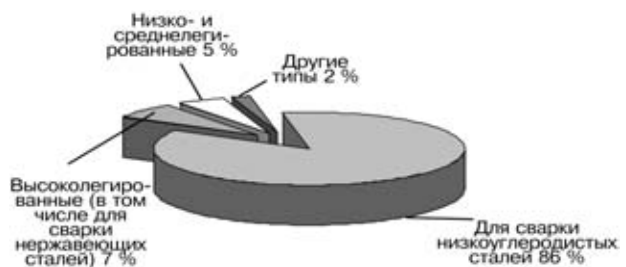


Рис. 6. Доля производства покрытых электродов различного назначения в странах ЕС в 2000 г. (из общей доли электродов для сварки низкоуглеродистых сталей примерно 2/3 составляют электроды с рутиловым покрытием)

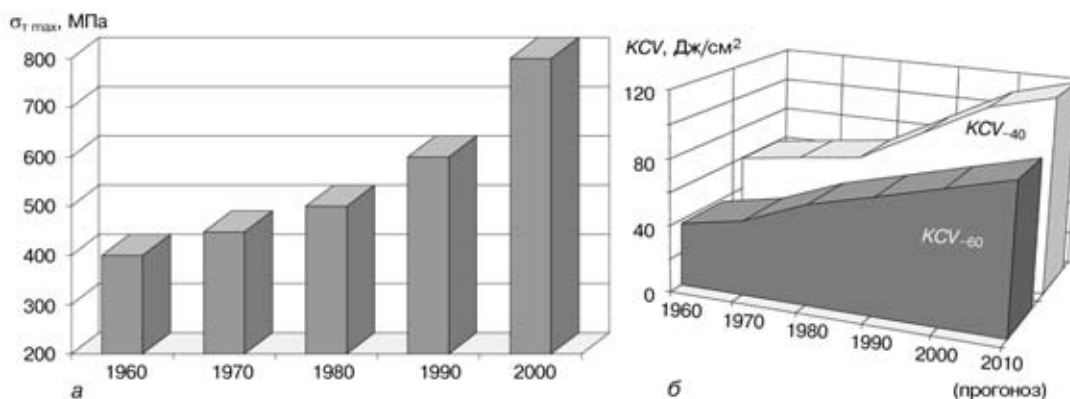


Рис. 7. Механические свойства сварных соединений ВПНЛ сталей: а – максимальный предел текучести  $\sigma_{т\max}$ ; б – ударная вязкость KCV

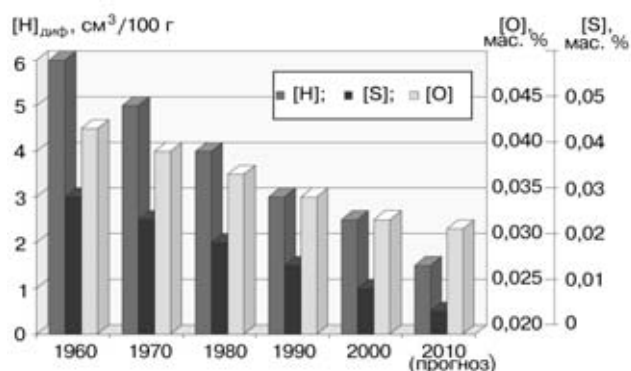


Рис. 8. Содержание примесей в сварных соединениях ВПНЛ сталей

$\sigma_t, \text{ МПа}$	Температура основного металла, °С			
	10...40	41...70	71...100	101...130
315	-25	0	+10	+20
390	0	+10	+20	+60
500, 620	+10	+20	+80	+100
690	+80	+80	+100	+120
780	+80	+100	+120	+120

без подогрева  
 подсушка (при 40...50 °С)  
 подогрев

Рис. 9. Необходимая температура подогрева основного металла (концентрация диффузионного водорода в наплавленном металле не должна превышать 2 см<sup>3</sup>/100 г)

ИЭС им. Е. О. Патона были созданы способы производства высокопрочных корпусных сталей типа АБ с пределом текучести до 1000 МПа (в работе [7] приведены характеристики этих сталей). В них уменьшено содержание углерода и легирующих элементов до уровня, обеспечивающего сквозную прокаливаемость. После термообработки структура стали представляет собой высокодисперсный сорбит с твердорастворным упрочнением ферритной матрицы, наличие которого обеспечивает высокую прочность, пластичность и хорошую свариваемость. На рис. 7 и 8 представлены данные о прогрессе в металлургии и технологии сварки ВПНЛ сталей. Благодаря исследованиям, выполненным в Украине, было достигнуто значительное снижение концентрации водорода, серы и кислорода в металле сварных швов, повышение его механических свойств, улучшение свариваемости, а также снижение температуры подогрева. Данные о содержании примесей в современных ВПНЛ сталях приведены в табл. 1.

**Основные тенденции развития ВПНЛ сталей.**

При разработке сварочных материалов и технологий сварки необходимо учитывать следующие факторы: уменьшение диапазона концентраций ле-

гирующих элементов; увеличение комбинаций микролегирующих элементов; снижение содержания углерода; уменьшение массовой доли остаточных элементов, серы и фосфора; снижение концентрации водорода, азота, кислорода; увеличение однородности и уровня механических свойств; улучшение деформируемости; улучшение свариваемости и вязкости сварных швов и соединений.

Важнейшей проблемой при сварке ВПНЛ сталей является предупреждение хрупкого разрушения сварных соединений. Это явление вызвано структурными превращениями в сварном шве и зоне термического влияния (ЗТВ), а также охрупчивающим действием растворенных в металле примесей, и прежде всего водорода, проявляющемся в возникновении индуцированных водородом трещин и замедленном разрушении сварных соединений. Для предупреждения этого современные технологии сварки сталей указанного типа предполагают использование предварительного и сопутствующего подогрева изделий. Это энерго- и трудоемкие, а также дорогостоящие операции (рис. 9 и 10), выполнение которых требует высокой технологической культуры производства. Однако они далеко не всегда обеспечивают отсутствие трещин в сварных соединениях. В связи с высокой температурой изделий, вызванной подогревом, резко ухудшаются условия труда сборщиков и сварщиков.

Изготовление конструкций из ВПНЛ сталей без предварительного по-

Таблица 1. Содержание примесей (мас. %) в ВПНЛ сталях

Класс стали по чистоте	S	P	N	O	H	N, O и H (в сумме)
Обычная	≤ 0,005	≤ 0,010	0,006	0,004	0,0002	≤ 0,0250
Чистая (экономически целесообразная)	≤ 0,002	≤ 0,005	0,004	0,001	0,0001	≤ 0,0120

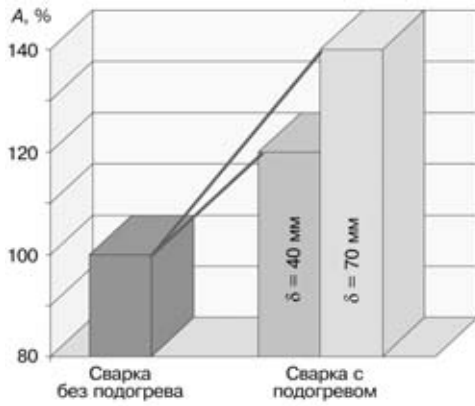


Рис. 10. Стоимость  $A$  сварочных работ [7] ( $\delta$  — толщина свариваемой стали)

догрева — одна из основных проблем дуговой сварки в настоящее время. Результаты исследований по проблеме поведения водорода в сварных соединениях обобщены в работах [8–17]. Эта проблема является актуальной для всех способов дуговой сварки плавящимся электродом и должна обязательно приниматься во внимание при разработке сварочных материалов.

Температура подогрева конструкций зависит от концентрации диффузионного водорода в металле швов, эквивалента углерода  $P_{см}$  и погонной энергии сварки  $q$  (рис. 11).

В сталях и сварных соединениях перенос водорода определяется его диффузией в полях градиента концентраций и напряжений, термодиффузией, поверхностной диффузией, диффузией по дефектам структуры, транспортировкой, дислокациями. Моделирование распределения водорода в сварном соединении при наличии концентратора напряжений выполнено Н. Юриокой (рис. 12). Как видно из рисунка, водород в сварном соединении распределяется неравномерно — повышенная концентрация в ЗТВ и по линии сплавления. Характер его распределения зависит от отношения температур начала мартенситного превращения в металле сварных швов ( $M_{s_{мш}}$ ) и ЗТВ ( $M_{s_{зТВ}}$ ) (рис. 13). При  $M_{s_{мш}} > M_{s_{зТВ}}$  мартенсит в металле швов образуется раньше, чем в ЗТВ, ко-

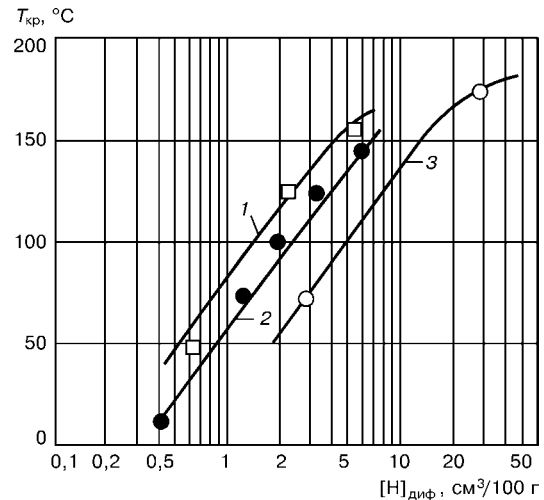


Рис. 11. Зависимость критической температуры подогрева  $T_{кр}$ , необходимой для предотвращения образования трещин при сварке стали с пределом текучести 460 МПа [8], от концентрации диффузионного водорода  $[H]_{диф}$  в металле шва: 1 — сварка под флюсом ( $q = 3,0$  кДж/мм,  $P_{см} = 0,235$ ); 2 — сварка покрытыми электродами ( $q = 1,7$  кДж/мм,  $P_{см} = 0,235$ ); 3 — сварка покрытыми электродами ( $q = 1,7$  кДж/мм,  $P_{см} = 0,212$ )

торая становится барьером для транспортировки водорода. В ней наблюдается высокая концентрация диффузионного водорода и создаются потенциальные условия для образования трещин (рис. 13, а). При  $M_{s_{мш}} < M_{s_{зТВ}}$  мартенсит в ЗТВ

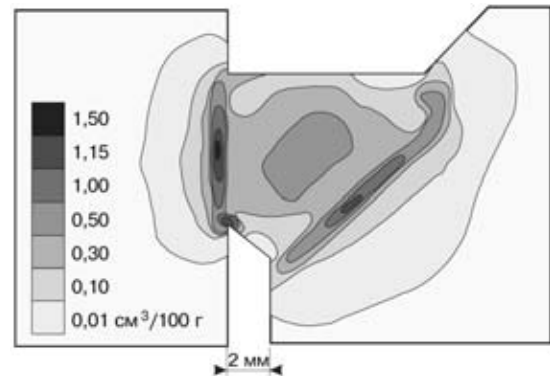


Рис. 12. Распределение концентраций водорода в металле шва и ЗТВ через 5 ч после сварки без предварительного подогрева [8]

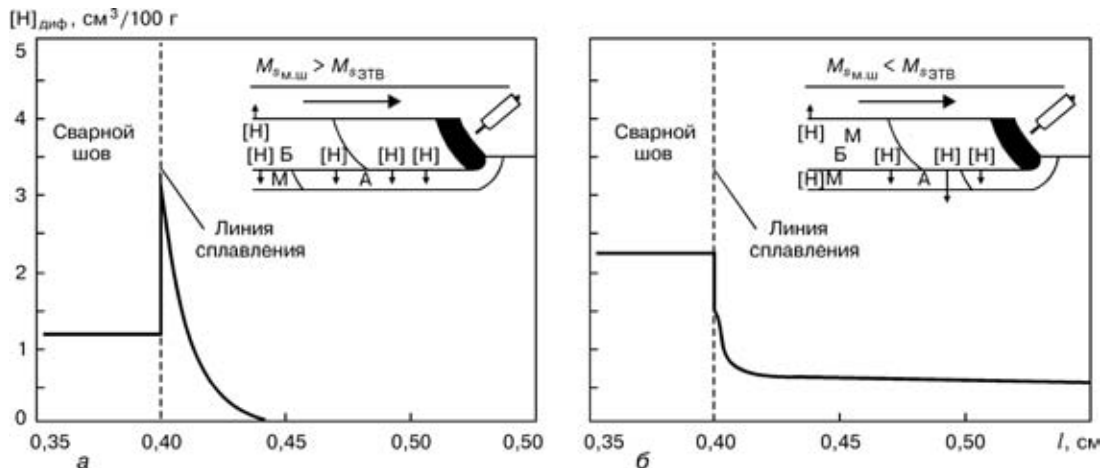


Рис. 13. Распределение водорода по линии сплавления в различном по химическому составу металле швов и ЗТВ: а —  $M_{s_{мш}}$  при 600 °С;  $M_{s_{зТВ}}$  при 500 °С; б —  $M_{s_{мш}}$  при 500 °С;  $M_{s_{зТВ}}$  при 600 °С;  $l$  — расстояние от оси шва; А — аустенит; Б — бейнит; М — мартенсит

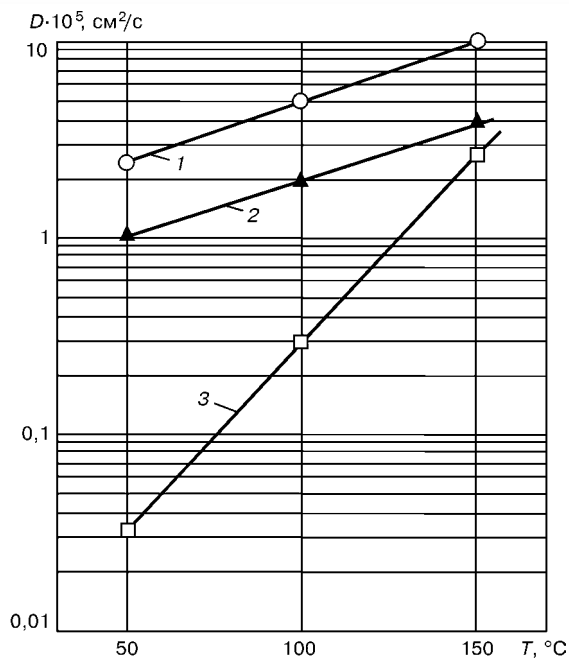


Рис. 14. Температурные зависимости коэффициента диффузии  $D$  водорода в металле швов, полученных с использованием основных (1) и рутиловых (2) электродов, и константы скорости выделения водорода из «ловушек» в металле, наплавленном рутиловыми электродами (3)

образуется раньше, чем в металле швов (рис. 13, б). У последних концентрация диффузионного водорода более высока, поэтому большая вероятность образования трещин [10].

Диффузия водорода в металле швов зависит от их химического состава, структуры, а также наличия дефектов в виде пор и неметаллических включений. Данные о массопереносе водорода в металле швов приведены на рис. 14.

Скорость массопереноса водорода в металле швов, выполненных электродами с основным покрытием в несколько раз выше, чем в швах, сваренных с использованием электродов рутилового типа. Это связано с наличием большого количества «ловушек» водорода — неметаллических включений и мелких пор в металле швов, полученных указанным способом. «Ловушки» водорода могут дополнительно образовываться в металле шва при его деформации. С увеличением количества дефектов в металле массоперенос замедляется [11].

Уменьшить концентрацию диффузионного водорода в металле швов можно за счет его мик-

ролегирования редкоземельными металлами и гидридообразующими элементами. На рис. 15 приведены данные о влиянии редкоземельных металлов и иттрия на концентрацию диффузионного водорода. При введении редкоземельных металлов происходит перераспределение водорода в металле швов — снижается концентрация диффузионного водорода  $[H]_{диф}$  и повышается остаточного  $[H]_{ост}$ . Образующиеся при микролегировании швов редкоземельными металлами оксисульфиды аккумулируют водород.

Перераспределение водорода в металле швов может происходить при фазовых превращениях и зависит от скорости охлаждения. Тогда роль «ловушек» в металле швов выполняет остаточный аустенит (рис. 16) [18].

Захват водорода «ловушками» объясняют низкой скоростью массопереноса водорода в остаточном аустените. При наличии остаточного аустенита в металле швов с помощью стандартных измерений было определено, что при температуре до 250 °C концентрация водорода занижена. Это необходимо учитывать при прогнозировании образования индуцированных водородом трещин в сварных соединениях.

Концентрация водорода в металле сварных швов и соединениях в основном зависит от количества влаги и водородсодержащих веществ в электродных покрытиях, флюсах, сердечниках порошковых проволок и др. При создании ультранизководородных сварочных материалов следует учитывать концентрацию водорода в проволоках и основном металле. Для ее уменьшения в сырьевых и готовых сварочных материалах используют в основном термообработку электродов и флюсов, осушение защитных газов. Разработаны способы снижения гигроскопичности покрытий и вакуумная упаковка электродов. В материалах для сварки высокопрочных сталей содержание потенциального водорода необходимо сводить к минимуму. Температура прокалки электродов ограничивается 450 °C. Дальнейшее ее повышение приводит к диссоциации составляющих покрытия. В смесях минералов температура начала диссоциации может быть ниже, чем в исходных минералах.

Одним из главных источников поступления водорода является сухой остаток жидкого стекла. Регулируя модуль и вязкость жидкого стекла, можно существенно снизить потенциальное содержание

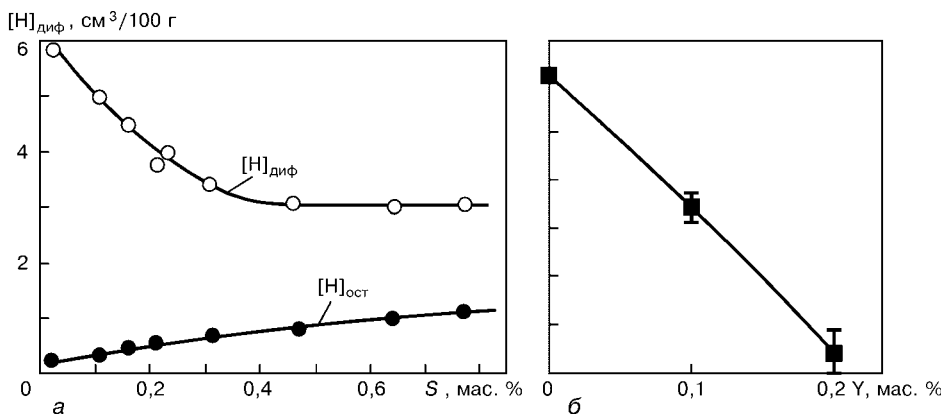


Рис. 15. Влияние содержания редкоземельных металлов  $S$  (а) и иттрия (б) на концентрацию диффузионного водорода в металле сварных швов [10, 11], выполненных сваркой в смеси 0,1 %  $H_2 + Ar$

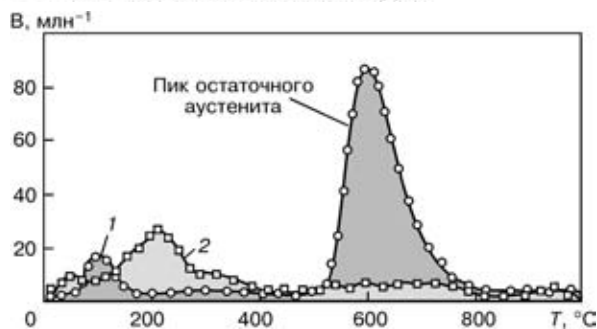


Рис. 16. Термодесорбционный анализ перераспределения водорода (В) в металле сварного шва, выполненного на ВПНЛ сталях, при фазовых превращениях [18]: 1 — охлаждение металла сварного шва на воздухе; 2 — то же в жидком азоте

водорода в покрытии электродов (флюсе). Значительное количество водорода выделяется из минералов при температуре, превышающей температуру прокалки электродов и флюсов. В этом случае для снижения концентрации водорода в металле шва предложено ряд металлургических способов, основанных на связывании водорода в атмосфере дуги в нерастворимые в жидкой стали гидроксил  $\text{OH}$  и фтористый водород  $\text{HF}$ . Расчеты показали, что введение в газовую фазу тетрафторида кремния  $\text{SiF}_4$  более эффективно, чем молекулярного кислорода. Тетрафторид кремния образуется при взаимодействии  $\text{CaF}_2$  с  $\text{SiO}_2$ . Расчеты парциального давления  $\text{SiF}_4$  для системы  $\text{CaF}_2$ – $\text{SiO}_2$  приведены в работе [19]. Здесь же содержатся экспериментальные данные о концентрации водорода в металле шва, наплавленном электродами с различным количеством  $\text{CaF}_2$  и  $\text{SiO}_2$  в покрытии. Наблюдается хорошая корреляция между парциальным давлением  $\text{SiF}_4$  и концентрацией водорода. Еще более эффективным является путь концентрации водорода за счет введения в покрытие (флюс) и сердечник порошковой проволоки кремнефторидов.

**Материалы для сварки ВПНЛ сталей.** Элементный состав металла шва обычно выбирается исходя из требований создания равнопрочного сварного соединения. Важнейшая задача — обеспечить высокую хладостойкости металла швов при температурах до  $-60^\circ\text{C}$ . Принято несколько систем легирования металла шва —  $\text{Cr-Ni-Mn-Cu-Mo}$ ;  $\text{Mn-Ni-Ti}$ ;  $\text{Mn-Ni-Mo-Ti}$ . Содержание этих элементов зависит от требуемой прочности и пластичности сварного соединения. Используется микролегирование бором и титаном. Применяется очень чистая по содержанию серы и фосфора сварочная проволока (0,01... 0,02 %), массовая доля углерода в ней составляет 0,04... 0,08 %. Содержание легирующих элементов и раскислителей, а также режимы сварки необходимо выбирать так, чтобы обеспечить массовую долю кислорода в металле шва в пределах 0,02... 0,04 %. Образующиеся в этом случае оксиды титана, например  $\text{TiO}$ , являются центрами зарождения игл феррита [20]. Структура игольчатого феррита благоприятна для получения металла шва, вязкого при низких температурах.

Взаимосвязь между химическим составом, структурой и свойствами металла швов, выполненных на ВПНЛ сталях, подробно рассмотрена

в работах [21, 22]. Характеристики некоторых электродов приведены в работах [23–28].

Для сварки используются высокоосновные агломерированные флюсы и электроды с покрытием основного вида. При сварке ВПНЛ сталей с массовой долей углерода 0,1... 0,2 % требуется предварительный подогрев изделий. Появление индуцированных водородом трещин чаще всего наблюдается в ЗТВ. Проблему создания соединений, не подверженных растрескиванию, пытаются решить путем разработки сталей с особо низким (до 0,02 мас. %) содержанием углерода и более высокой степенью легирования. При сварке конструкций из таких сталей индуцированные водородом холодные трещины будут образовываться в металле шва. Решение этой проблемы связано с разработкой надежных методов управления поведением водорода в сварных соединениях.

Благодаря фундаментальным исследованиям явлений обратимой водородной хрупкости, выполненным в ИЭС им. Е.О. Патона [15–17], был изучен механизм этого процесса на атомном уровне.

Направления дальнейших исследований можно сформулировать следующим образом:

- изучение гетерофазных взаимодействий, которые происходят при нагреве и плавлении электродов, флюсов, порошковых проволок;

- уменьшение концентрации водорода в сварных соединениях за счет уменьшения содержания соединений водорода в шлаковых системах и контроля плазменно-химических реакций в атмосфере дуги;

- увеличение сопротивляемости металла шва и ЗТВ водородному охрупчиванию;

- физическое и математическое моделирование поведения водорода в сварных соединениях;

- управление состоянием сварных соединений для предотвращения образования холодных трещин, в том числе путем создания «ловушек» водорода в металле шва для уменьшения концентрации диффузионного водорода и ограничения его массопереноса из металла шва в ЗТВ;

- развитие научных основ получения металла сварных швов и соединений с высокой прочностью, пластичностью и ударной вязкостью;

- совершенствование оборудования и технологии производства высококачественных сварочных материалов общего и специального назначения.

**Электроды общего назначения.** Сегодня основными сталями, которые используются в промышленности и строительстве в странах СНГ, являются низкоуглеродистые и низколегированные стали. На долю электродов общего назначения с рутиловым и ильменитовым покрытием приходится около 80 % выпускаемых электродов. Следует отметить, что *механические свойства* сварных соединений, выполненных этими электродами, в основном удовлетворяют требованиям отечественных, европейских и американских стандартов. Совершенствование этих электродов должно идти в направлении улучшения стабильности горения дуги, формирования швов, отделимости шлаковой корки, предупреждения пор и горячих трещин. Эти вопросы подробно рассмотрены в обзоре [29].



Введение легкоионизирующихся элементов в покрытие приводит к повышению концентрации положительных ионов в периферийной области дуги, уменьшению ее контрагирования и снижению работы выхода электронов из катода. В этом случае необходимая плотность электронов тока может быть достигнута при меньшей напряженности электрического поля у катода.

*Отделимость шлаковой корки* в значительной мере определяется процессами взаимодействия шлака с закристаллизовавшимся металлом сварочной ванны. На границе металл–шлак формируется тонкая прослойка, как правило, представляющая собой нестехиометрические оксиды или шпинели. Если значения параметров кристаллической решетки этих соединений близки параметрам решетки металла, то происходит химическое сцепление и эпитаксиальный рост шлаковой фазы, при этом отделимость шлака ухудшается. Регулировать этот процесс можно, изменяя активность кислорода в шлаке. В случае плохого формирования шва, наличия подрезов происходит механическое заклинивание шлака с ухудшением его отделимости.

*Вопросы пористости* подробно рассмотрены в работе [30]. Здесь показано, что пористость швов при сварке электродами этого типа вызвана водородом, растворенным в сварочной ванне. Концентрация водорода в сварочной ванне значительно выше равновесной, поэтому предупредить образование пор в этом случае можно путем регулирования межфазного натяжения на границе металл–газ. Весьма эффективно повышение окислительного потенциала металла, что позволяет снизить вероятность зарождения пузырьков газа. Еще одним способом предотвращения образования пор является управление скоростью роста пузырьков водорода за счет снижения содержания кремния в сварочной ванне.

*Образование горячих (кристаллизационных) трещин* в швах низкоуглеродистых и низколегированных сталей связано, как правило, с повышением содержания углерода и серы в сварочной ванне [31]. Источником серы является основной металл, сварочная проволока и компоненты покрытия. В отечественных массового применения сталях допускается более высокое содержание серы, чем в зарубежных (то же можно сказать и о сварочных проволоках). Предупредить образование горячих трещин в сварных швах можно, повысив массовую долю марганца в наплавленном металле до 0,6... 0,8 %.

Электроды с основным покрытием используются, как известно, для сварки ответственных конструкций из сталей различного типа. Проблемы улучшения сварочно-технологических свойств электродов и механических свойств сварных соединений были рассмотрены выше.

Одним из серьезных дефектов при сварке электродами с основным покрытием является «стартовая» пористость швов. Проведенные исследования показали, что появление такого дефекта связано с абсорбцией азота каплями электродного металла и сварочной ванны. При сварке под основными шлаками, содержащими фтористые соединения,

расплавленный металл капли и ванны, плохо защищенный шлаком, непосредственно контактирует с плазмой дугового разряда. В условиях термодинамического равновесия лимитирующим звеном в процессе абсорбции является диссоциация молекул газа у поверхности металла. При абсорбции газов из плазмы дугового разряда степень диссоциации газов определяется температурой плазмы.

Результаты проведенных исследований показали, что теплосодержание капель электродного металла зависит от тока и его полярности [19]. Во многих случаях температура капель превышает температуру максимальной растворимости газов в железе. Поэтому различие температуры капель в 200... 300 К при сварке плавящимся электродом при прямой и обратной полярности тока может оказать значительное влияние на абсорбцию газов. Наблюдаемое на практике более высокое содержание газов в металле в случае сварки на переменном токе при прямой полярности подтверждает это положение.

Абсорбция азота зависит от длины дуги. Уменьшение длины дуги за счет нанесения на торец электропроводных композиций и заострение торца электрода позволяют сократить длину дуги при отрыве электрода в момент зажигания. Уменьшение абсорбции азота можно достичь путем снижения межфазного натяжения на границе шлак–металл для улучшения шлаковой защиты расплавленного металла на стадии капли и ванны, повышения температуры капель и достижения мелкокапельного или струйного переноса металла за счет перехода от дугового разряда в газах к парогазовому разряду. Эти же явления наблюдаются при взаимодействии металла с водородом. Физико-химические аспекты этого процесса рассматривались выше.

Важнейшие вопросы, требующие решения при разработке электродов с основным покрытием, следующие: улучшение сварочно-технологических свойств; повышение ударной вязкости сварных соединений за счет снижения содержания вредных примесей и микролегирования; уменьшение концентрации водорода в металле швов благодаря предупреждению абсорбции влаги при использовании негигроскопичных видов сырья; применение высокомодульных низковязких жидких стекол; оптимизация температуры проковки и обеспечение равномерной температуры и влажности в сушильно-прокалочных печах.

Очень важное значение имеют исследования, направленные на *улучшение гигиенических характеристик* электродов. Результаты работ, выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона в сотрудничестве с гигиенистами, токсикологами, химиками, биофизиками, обобщены в работе [32].

Главные положения этих исследований могут быть сформулированы следующим образом [33]: основной токсичный ингредиент при сварке плавлением — твердая составляющая сварочного аэрозоля (ТССА);

ТССА образуется в результате испарения металлургического и шлакового расплавов, особенно ин-



тенсивно испаряются элементы с высокой упругостью пара;

при плавлении электродов с рутиловым и ильменитовым покрытиями испарение марганца из металлического расплава на порядок выше, чем из шлакового;

испарение элементов и соединений из шлака зависит от его основности, с увеличением последней интенсивно испаряются соединения щелочных и щелочноземельных металлов;

улучшить санитарно-гигиенические характеристики электродов с рутиловым или ильменитовым покрытиями можно путем снижения основности шлака и межфазного натяжения на границе металл–шлак;

перегрев капель электродного металла, сварочной ванны и шлака способствует увеличению количества образующегося ТССА, снизить температуру расплавленного металла и шлака можно за счет повышения коэффициента массы покрытия и увеличения в нем содержания железного порошка;

при плавлении электродов с основным покрытием, помимо испарения марганца (хрома), важное значение имеет газовая составляющая аэрозоля, которая представляет собой фтористые соединения щелочных и щелочноземельных металлов, а также HF и SiF<sub>4</sub>; выделение этих газов нужно регулировать путем управления активностью оксида кремния в шлаке и содержанием влаги в покрытии;

предельно-допустимая концентрация вредных веществ в ТССА установлена без учета особенностей строения, состава и размера его частиц; комбинированное воздействие на организм группы элементов или сложных соединений может ослаблять или усиливать влияние наиболее токсичных составляющих сварочного аэрозоля;

необходимо продолжать и развивать работы по моделированию и прогнозированию биологического воздействия ТССА на организм человека с учетом результатов комплексных исследований, выполненных в 1980–1990-х гг.

**Сварочные проволоки.** *Проволоки сплошного сечения.* В этом разделе рассматриваются стальные сварочные проволоки, которые используются для изготовления покрытых электродов, применяемых при механизированной дуговой сварке в защитных газах и под флюсом, электрошлаковой сварке и в качестве присадочных прутков при сварке неплавящимся электродом.

Сталь для проволок выплавляется в кислородных конверторах, мартеновских и электродуговых печах и разливается либо в слитки, либо в заготовки на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В ряде случаев сталь для изготовления проволок подвергается специальной обработке с целью снижения содержания вредных примесей, неметаллических включений и дегазации металла. Слитки (заготовки) прокатываются по традиционной технологии. Катаная проволока подвергается холодному деформированию волочением. Требования к проволоке регламентируются стандартом ГОСТ 2246–70, который уже в значительной степени устарел.

Дальнейшее развитие проволок сплошного сечения будет идти по пути совершенствования их

составов для улучшения сварочно-технологических, металлургических характеристик процесса сварки и улучшения свойств сварных соединений, а именно: минимизация содержания вредных примесей (серы, фосфора, мышьяка, сурьмы и др.); микролегирование титаном, стронцием, бором, редкоземельными металлами и др.; уменьшение массовой доли углерода в некоторых марках высоколегированных проволок; оптимизация систем легирования; снижение содержания газов в проволоке; повышение однородности заготовки и уменьшения допустимых отклонений содержания элементов от номинального состава. Предпочтительны заготовки, полученные из конверторной стали на установках МНЛЗ. Необходимо совершенствовать технологии выплавки стали и ее дальнейшей обработки.

Необходимо обеспечивать высокую пластичность заготовок для повышения надежности процесса волочения, требуемые механические свойства проволок, высококачественную и очищенную их поверхность без надрывов и задигов, отсутствие овальности, минимальные отклонения размеров заготовок от заданного.

*Порошковые проволоки.* Промышленное производство порошковых проволок в СССР было создано в 1950–1960-х гг. и с тех пор интенсивно развивалось. Порошковые проволоки эффективно использовались в ряде отраслей промышленности и строительства. Уровень разработок был достаточно высок, о чем свидетельствуют полученные многочисленные авторские свидетельства и патенты, а также продажа наших лицензий за рубежом и организация производства в ряде стран — США, ФРГ, Франции, Японии, Венгрии, Болгарии и др. Характеристики этих проволок и особенности технологии сварки приведены в каталоге [34].

Развал экономики в 1990-е годы привел к падению уровня производства. Сейчас порошковые проволоки изготавливаются на устаревших мощностях объединений «Северсталь» в России и «ДнепрOMETIZ» в Украине. Сохранившееся оборудование эксплуатируется на износ. Производятся проволоки, разработанные еще в 1970–1980-х гг. Между тем, это прогрессивное направление сварочной техники успешно развивается в таких странах, как США, Япония, Франция, ФРГ, Южная Корея, Швеция, Голландия, Австрия и др. Там созданы новые марки проволок, расширены области их применения, совершенствуется оборудование и технология производства. Например, «Lincoln Electric», «Hobart», ESAB, «SAF-Oerlikon», «Thyssen Böhler», «Kobelko», «Elga» и другие фирмы производят десятки марок порошковых проволок для сварки в углекислом газе и смеси Ar + CO<sub>2</sub>, а также самозащитные проволоки и проволоки для сварки под флюсом. Эти типы сварочных материалов предназначены для сварки низкоуглеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высокопрочных, жаропрочных, нержавеющей сталей, используемых в судостроении, машиностроении, энергетике, горнодобывающей промышленности, строительстве и других отраслях [33–39].





Необходимо отметить, что в указанные годы выполнялись разработки порошковых проволок в ряде организаций Украины и России. В ИЭС им. Е. О. Патона были созданы порошковые проволоки нового поколения [40] в соответствии с европейским стандартом EN 758 и ГОСТ 26271.

Для сварки углеродистых и низколегированных сталей массового назначения разработаны проволоки марок ПП-АН59, ПП-АН63, ПП-АН69, для сварки ВПНЛ сталей — ПП-АН61, ПП-АН67. Эти проволоки имеют трубчатую конструкцию и диаметр от 1,2 до 2,0 мм. Их характеристики приведены в табл. 2 и 3.

Швы, выполненные сваркой с использованием новых проволок, отличаются хорошей формой, малым количеством брызг и аэрозоль. При расплавлении проволоки ПП-АН59 и ПП-АН63 рутилового типа образуют быстротвердеющие короткие шлаки. Они пригодны для сварки во всех пространственных положениях. Для автоматизированной и роботизированной сварки в углекислом газе или смеси  $Ar + CO_2$ , применяемой в судостроении и машиностроении, разработана проволока ПП-АН70 с металлическим сердечником. Производительность наплавки при использовании этой проволоки на 20 % выше проволок сплошного сечения того же диаметра. Эта проволока имеет значительно более высокие сварочно-технологические свойства по сравнению с проволокой Св-08Г2С.

В ИЭС им. Е. О. Патона созданы самозащитные порошковые проволоки с фторидно-основным сердечником [41]. Благодаря такой композиции сердечника снижается содержание кремния и алюминия в металле швов и обеспечивается требуемая ударная вязкость сварных соединений при низких температурах.

ЦНИИКМ «Прометей» проводит работу по созданию газозащитных порошковых проволок марок 48-ПП-8Н, 48-ПП-11Р, 48-ПП-12Р диаметром 1,2... 1,6 мм для сварки низкоуглеродистых ВПНЛ сталей с пределом текучести от 400 до 620 МПа [42]. В настоящее время технология сварки данными проволоками проходит опытно-промышленную проверку на судостроительных заводах России, а также совершенствуется технология производства проволок. В ОАО «НИИМонтаж» созданы самозащитные порошковые проволоки для сварки во всех пространственных положениях, обеспечивающие получение металла шва с пределом текучести до 490 МПа [43].

Важнейшее значение в дальнейшем развитии порошковых проволок имеет прежде всего создание современного высокопроизводительного оборудования и технологии производства порошковых проволок малого диаметра. В последние годы рекламируется способ изготовления порошковых проволок методом прокатки-волочения. На поверхности изготовленных по этой технологии проволок остается тончайший слой волочильной смазки, бла-

**Таблица 2. Механические свойства металла сварных швов, выполненных порошковыми проволоками**

Марка проволоки	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Температура (°С), обеспечивающая требуемый уровень ударной вязкости*	Характеристика шлака
ПП-АН59	420	550...600	24...28	-20	Быстротвердеющий на рутиловой основе
ПП-АН63	420	520...560	25...29	-20	То же
ПП-АН69	420	510...540	28...33	-30	Основной
ПП-АН61	460	550...630	23...25	-40	На рутиловой основе
ПП-АН67	560	700...760	18...20	-30	Основной

\*Работа удара составляла не менее 47 Дж.

**Таблица 3. Химический состав металла (мас. %), наплавленного порошковыми проволоками\***

Марка проволоки	C	Mn	Si	Ni	[H] <sub>диф</sub> (см <sup>3</sup> /100 г) в наплавленном металле
ПП-АН59	0,05...0,08	1,1...1,5	0,3...0,6	0,4...0,6	5...8
ПП-АН63	0,04...0,07	1,2...1,6	0,3...0,5	—	5...8
ПП-АН69	0,07...0,09	1,3...1,5	0,3...0,4	—	4...7
ПП-АН61	0,03...0,07	1,1...1,5	0,3...0,5	1,3...1,7	3...5
ПП-АН67	0,04...0,09	1,1...1,3	0,3...0,4	1,1...1,3	3...5

\*Массовая доля хрома и молибдена составляет 0,2... 0,4 %.

годаря которому в атмосферу дуги при механизированной сварке не вносится значительное количество водорода и обеспечивается хорошая подача проволоки по гибким шлангам.

В ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ОЗСМ ИЭС и заводом тяжелого машиностроения в Алматы было создано современное оборудование и технология изготовления порошковых проволок малого диаметра. Комплект оборудования для основных операций производства оснащен современными средствами объективного управления, документирования технологических операций и диагностики [44]. Новое оборудование с проектной производительностью 1000 т в год было поставлено на заводы Китая. Достигнутая производительность превысила проектную в 1,5 раза. Таким образом, созданы все условия для производства новых проволок на заводах России и Украины. Нужен серьезный анализ рынка и соответствующее финансирование этого проекта.

Разработаны технология и оборудование для производства порошковых проволок диаметром 9... 13 мм для инъекционной металлургии. Промышленное производство таких проволок налажено на фирме «Арксел» и на ОЗСМ ИЭС. За последние годы по этой технологии на заводах «Азовсталь», им. Ильича и других промышленных предприятиях обработаны миллионы тонн сталей различного назначения, при этом было достигнуто значительное улучшение их качества. Выпускаемые стали сертифицированы большинством страховых агентств



мира. Применение порошковых проволок имеет большое будущее. У специалистов Украины и России достаточно знаний и опыта, чтобы возродить современное производство этих материалов.

**Сварочные флюсы.** Способ сварки под флюсом, созданный в предвоенные годы в ИЭС им. Е. О. Патона, получил широкое распространение в нашей стране в судостроении, машиностроении, при строительстве мостов, производстве строительных металлоконструкций и др. Высокий уровень научных разработок, прогрессивные металлургические решения, хорошо организованное промышленное производство, низкая стоимость энергоносителей обеспечили массовый выпуск дешевых высококачественных плавящихся флюсов. По объемам производства плавящихся флюсов СССР занимал первое место в мире. Применение сварки под флюсом вызвало революционные преобразования во многих отраслях промышленности и в строительстве.

Сейчас производство сварочных флюсов в развитых странах стабилизировалось. Выпуск материалов для сварки под флюсом составляет 5... 10 % общего объема сварочных материалов. Металлургические и технологические особенности сварки под флюсом описаны во многих специальных изданиях [31, 45–49].

Снижение потребления сталей вызвало, естественно, многократное сокращение производства плавящихся флюсов и прежде всего энергоемкого производства флюсов в электропечах.

Работы последних лет были посвящены снижению содержания вредных примесей во флюсах, поиску современных систем флюс-проволока, обеспечивающих необходимые механические свойства сварных соединений, снижение содержания водорода во флюсах [49–53].

Как указывалось выше, в мире наблюдается рост производства ВПНЛ сталей. Высокие требования к механическим свойствам сварных соединений очень трудно выполнить, применяя плавящиеся флюсы. Проведенные исследования показали, например, что при сварке легированной проволокой, полученной вакуумно-индукционной плавкой под плавящим флюсом ФИМС-20П ВПНЛ стали типа 12ХН2МДФ, применяемой для изготовления ответственных конструкций, работающих на континентальном шельфе, требуемый уровень ударной вязкости обеспечивается лишь при температуре испытаний  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а под агломерированным флюсом — при  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  [54].

В странах Западной Европы в последние десятилетия плавящиеся флюсы повсеместно были заменены агломерированными, на долю которых приходится 95 % объемов потребления сварочных флюсов [55]. Это объясняется рядом металлургических возможностей агломерированных флюсов: регулирование кремневосстановительного процесса, рафинирование и микролегирование сварочной ванны, высокая прочность и ударная вязкость сварных соединений. Применение сварочных флюсов обеспечивает снижение в несколько раз энергоемкости производства, способствует уменьшению вредных выбросов токсичных пыли и газов в ат-

мосферу. Информация о современных агломерированных флюсах, а также описание технологии их производства содержатся в работах [54, 56–58].

В связи с развитием производства современных труб, судостроения, энергетического и химического машиностроения, строительства мостов в России и Украине, несомненно, будут возрастать объемы применения ВПНЛ сталей. Уже сейчас необходимо создать промышленные образцы оборудования и технологии производства этих флюсов, сертифицировать готовые разработки, проводить маркетинговую работу, организовывать экспорт продукции.

**Заключение.** Усилия исследователей и разработчиков необходимо сконцентрировать на поисках новых типов сырья и создании следующих новых сварочных материалов:

- электродов общего назначения с покрытиями рутилового и ильменитового видов с отличными сварочно-технологическими и гигиеническими свойствами;

- электродов нового поколения для сварки ВПНЛ сталей для судостроения, машиностроения, строительства;

- электродов общего назначения с покрытием основного вида, обеспечивающих ударную вязкость сварных соединений не ниже  $60\text{ Дж/см}^2$  при температуре испытаний  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

- электродов для сварки монтажных стыков современных магистральных трубопроводов;

- проволок и агломерированных флюсов для сварки ВПНЛ сталей с пределом текучести до 800 МПа;

- порошковых проволок с рутиловым и основным сердечником и проволок с металлическим сердечником малого диаметра для сварки в защитных газах во всех пространственных положениях;

- универсальных самозащитных порошковых проволок;

- специальных сварочных материалов различного назначения.

Приоритетными должны стать исследования и разработки нового высокопроизводительного оборудования и технологий изготовления сварочных материалов, систем аналитического сопровождения и управления качеством продукции.

В первой четверти XXI века сталь останется основным конструкционным материалом. По-прежнему будут широко использоваться низкоуглеродистые и низколегированные стали. Их качество, механические свойства и свариваемость будут улучшаться за счет снижения вредных примесей, поиска новых систем легирования, термической обработки, повышения коррозионной стойкости в различных средах. Опережающими темпами будут создаваться новые типы ВПНЛ сталей, в том числе с особо низким содержанием углерода, теплоустойчивых сталей, сталей для конструкций, работающих при низких климатических температурах, а также криогенной техники, высоколегированных сталей различного назначения. Дальнейшее развитие получают алюминиевые высокопрочные сплавы, легированные титановые сплавы и другие виды новых конструкционных материалов.

Дуговая сварка по-прежнему будет занимать лидирующее положение среди существующих спо-



соединения сварки плавлением. Прогресс в создании и производстве сварочных материалов зависит от тенденции развития конструкционных материалов. Основные решения в области создания новых сварочных материалов будут связаны с оптимизацией систем легирования металла шва в зависимости от структуры и свойств основного металла, поиска путей уменьшения содержания водорода, азота и других вредных примесей в металле швов, разработкой эффективных материалов и технологий, позволяющих повысить прочность и пластичность сварных соединений, снизить температуры предварительного подогрева, предупредить образование различных типов трещин, в том числе и индуцированных водородом. Будет производиться поиск новых шлаковых систем сердечников порошковых проволок, электродных покрытий и флюсов. Будут совершенствоваться металлургические и сварочно-технологические свойства электродов, флюсов, проволок сплошного сечения и порошковых, защитных газов с целью снижения пористости, предупреждения кристаллизационных трещин, улучшения провара, формы швов, отделимости шлаковой корки, стабильности горения дуги, снижения разбрызгивания.

Дальнейшее развитие получит математическое и физическое моделирование основных металлургических процессов дуговой сварки. Будут созданы компьютеризированные банки данных и база знаний, экспертные системы по сварочным материалам различного назначения.

В промышленно развитых странах будет и впредь снижаться доля выпуска покрытых электродов в общем объеме производства сварочных материалов и увеличиваться изготовление проволок для сварки в защитных газах сплошного сечения и особенно порошковых (с флюсовым и металлическим сердечниками), при этом доля производства сварочных флюсов сохранится. В развивающихся странах по-прежнему будет широко применяться дуговая сварка покрытыми электродами. Исследователям предстоит работать над снижением материалоемкости и энергоемкости сварочных материалов как в процессе их производства, так и применения. Преимущественно будут развиваться универсальные газозащитные порошковые проволоки малого диаметра и агломерированные флюсы, эффективные при сварке особо ответственных конструкций. Большое внимание также будет уделено созданию электродов, флюсов и проволок минимально адсорбирующих влагу, обеспечивающих хорошее повторное зажигание дуги, легкую их «подаваемость» сварочными полуавтоматами и автоматами, минимальное выделение сварочных аэрозолей.

В дальнейшем следует также работать в направлении совершенствования и повышения надежности оборудования и технологии производства сварочных материалов, изыскания сырьевых материалов стабильного качества, автоматизации аналитического контроля и технологического сопровождения производства. Будет улучшаться качество сварочных материалов, их товарный вид, упаковка и транспортировка. Следует совершенство-

вать подготовку специалистов различного профиля — исследователей и разработчиков сварочных материалов, а также технологов-производственников, высококвалифицированных техников и рабочих.

Совершенствование экономической системы, повышение конкуренции со стороны стран Запада и Востока заставит резко увеличить темпы экономико-технических преобразований и будет способствовать подъему производства сварных конструкций и сварочных материалов на новый уровень.

1. *Doria J. G.* Welding consumables: Market trends. — Istanbul: European Welding Association, 2001. — 20 p.
2. *Тихошов А.* Мировая война сталеваров // Известия. — 2002. — 19 сент. — С. 6.
3. *Игнатченко П. В., Бугай А. И.* Состояние производства сварочных материалов на пороге нового тысячелетия // Сб. докл. II Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Дуговая сварка. Материалы и качество на рубеже XXI века», г. Орел, 4–8 июня 2001 г. — Орел, 2001. — С. 81–83.
4. *The Japan Welding News for the World.* — 2001. — 5, № 17. — 10 p.
5. *Nassau L. van.* Expert report stick electrodes 2000: Stick electrodes. — Istanbul: European Welding Association, 2001. — 9 p.
6. *Morrison W.B.* Past and future development of HSLA steels // The 4th Intern. conf. «HSLA steels'2000», Oct. 30–Nov. 2, 2000, Xi'an, China Beijing: Metallurg Industry press, 2000. — P. 11–19.
7. *Перспективы и проблемы материаловедения в создании сварочных материалов и технологий сварки при строительстве уникальных ледостойких платформ* / И. В. Горынин, В. А. Малышевский, Ю. Л. Легостаев и др. // Сучасне матеріалознавство: XXI сторіччя / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 84–94.
8. *Yurioka N., Suzuki H.* Hydrogen assisted cracking in C-Mn and low alloy steel weldments // Intern. Materials Rev. — 1990. — 35, № 4. — P. 217–249.
9. *Yurioka N.* Predictive methods for prevention and control of hydrogen assisted cold cracking. — S. 1, [1999]. — 16 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1938–99).
10. *Мароэф И., Олсон Д. Л., Эдварс Г. Р.* Водородное растрескивание сварных изделий из высокопрочной стали // Сварка и родственные технологии — в XXI век. — Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1998. — С. 166–176.
11. *Походня И. К.* Проблемы сварки высокопрочных низколегированных сталей // Сучасне матеріалознавство: XXI сторіччя / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 31–69.
12. *Shvachko V. I., Stepanyuk S. N., Pokhodnya I. K.* The evolution methods of HSLA steels susceptibility to hydrogen embrittlement // The 4th Intern. conf. «HSLA steels'2000», Oct. 30–Nov. 2, 2000, Xi'an, China Beijing: Metallurg. Industry press, 2000. — P. 453–458.
13. *Gedeon S. A., Eagar T. W.* Assessing hydrogen-assisted cracking fracture modes in high-strength steel weldments // Welding J. — 1990. — № 6. — P. 213.
14. *Gedeon S. A., Eagar T. W.* Thermomechanical analysis of hydrogen absorption in welding // Ibid. — 1990. — № 7. — P. 264.
15. *Походня И. К., Степанюк С. Н., Швачко В. И.* Роль температуры при водородном растрескивании конструкционных сталей и сварных соединений // Автомат. сварка. — 2000. — № 2. — С. 3–8.
16. *Швачко В.И.* Оборотна воднева крихкість ОЦК-сплавів заліза — конструкційних сталей: Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук / ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут». — Харків, 2002. — 35 с.
17. *Степанюк С. М.* Оборотна воднева крихкість при зварюванні високоміцних низьколегованих сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ІЕС ім. Е. О. Патона. — К., 2001. — 18 с.
18. *Retained austenite as a hydrogen trap in steel welds* / Y. D. Park, I. S. Maroef, A. Landau, D. L. Olson // Welding J. — 2002. — February. — P. 19–35.
19. *Походня И. К.* Математическое моделирование процессов взаимодействия металла с газами при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 3–10.



20. *Abson D. J.* Microstructure and mechanical properties of vertical-up C-Mn-Ni steel semi-automatic weld metal // *Welding Inst. Res. Rep.* — 1987. — N 7. — P. 1–30.
21. *Барышников А. П., Грищенко Л. В., Петрыкин В. И.* Сварка высокопрочных хладостойких сталей в среде защитных газов и покрытыми электродами // *Прогрессивные материалы и технологии.* — 1996. — № 2. — С. 207–220.
22. *Мальшевский В. А., Грищенко Л. В., Барышников А. П.* Сварочные материалы и технология сварки высокопрочных сталей // *Вопр. материаловедения.* — 1999. — № 3 (20). — С. 69–77.
23. *Пути* повышения сварочно-технологических характеристик электродов с покрытием основного типа, предназначенных для сварки высокопрочных и хладостойких сталей // *В. В. Гежа, А. П. Барышников, Л. В. Грищенко, М. Г. Шаранов* // Там же. — 2000. — № 1 (21). — С. 69–77.
24. *Электроды АНО-ТМ* для сварки морских стационарных платформ // *И. К. Походня, С. С. Милченко, В. Н. Горпенюк и др.* // *Технология судостроения.* — 1990. — № 9. — С. 77–79.
25. *Явдошн И. Р.* Новые электроды ИЭС им. Е. О. Патона для сварки конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей // *Сб. докл. I Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Состояние и перспективы развития сварочных материалов в странах СНГ», Краснодар, 23–26 июня 1998 г.* — М., 1998. — С. 135–137.
26. *Марченко А. Е., Скорина Н. В.* Электроды типа Э70-Э85 для сварки высокопрочных хладостойких сталей // Там же. — С. 30–33.
27. *Экономнолегированные электроды типов Э70-Э85* для сварки высокопрочных хладостойких сталей // *Л. М. Лобанов, Л. И. Миходуй, В. Д. Позняков, О. Л. Миходуй* // Там же. — С. 28–29.
28. *Электроды* для сварки конструкций, работающих при низких температурах, и необходимость улучшения их технологических свойств // *В. А. Мальшевский, Л. В. Грищенко, А. П. Барышников и др.* // Там же. — С. 175–176.
29. *Походня И. К.* Металлургия сварки, состояние и проблемы // *Сварка и родственные технологии — в XXI век.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 227–245.
30. *Походня И. К.* Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
31. *Фрумш И. И.* Автоматическая износостойкая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.
32. *Vojtkevich V.* Welding fumes: Special Report. — Abington, 1995. — 110 p.
33. *Явдошн И. Р., Походня И. К.* Образование сварочного аэрозоля при дуговой сварке плавлением и его гигиеническая оценка // *Защита окружающей среды, здоровье и безопасность в сварочном производстве: Тр. I Междунар. науч.-практ. конф.* — Одесса: Астропринт, 2002. — С. 38–56.
34. *Порошковые проволоки* для электродуговой сварки: Каталог-справочник // *Под ред. И. К. Походни.* — Киев: Наук. думка, 1980. — 180 с.
35. *Altemuhle B.* The use of rutile cored wires for welding high-strength steel in crane fabrication // *Svetsaren.* — 2000. — № 3. — P. 24–27.
36. *Ferree S. E., Sierdzinski M. S.* Stainless steel metal cored wires for welding automotive exhaust systems // *Ibid.* — P. 15–18.
37. *Blome K.* Filarc PZ 6105R. The robot-friendly cored wire // *Ibid.* — № 1. — P. 22–24.
38. *Farrow N., Studholme S.* Sub-merged arc welding with fused flux and basic cored wire for low-temperature applications // *Ibid.* — P. 33–36.
39. *Fabshield 2125* // *Welding J.* — 1990. — № 7. — P. 3–5.
40. *Шлепаков В. Н., Рак П. И., Косенко П. А.* Порошковые проволоки нового поколения для сварки в среде защитных газов // *Сб. докл. II Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Дуговая сварка. Материалы и качество на рубеже XXI века», г. Орел, 4–8 июня 2001 г.* — Орел, 2001. — С. 57–59.
41. *Наумейко С. М.* Регулирование сварочно-технологических свойств порошковых проволок по данным физико-химических свойств шлаков // Там же. — С. 102–106.
42. *Проблемы* изготовления и опыт внедрения в производственных условиях порошковых проволок малых диаметров // *А. В. Баранов, Л. В. Грищенко, А. П. Барышников и др.* // Там же. — С. 62–63.
43. *Мойсов Л. П., Исаенко П. Р.* Проволока самозащитная порошковая ППТ-13 // Там же. — С. 61.
44. *Шлепаков В. Н.* Автоматизированное оборудование для производства порошковой проволоки // Там же. — С. 64–67.
45. *Низкокремнистые флюсы* для автоматической сварки и наплавки // *И. И. Фрумш, Д. М. Рабкин, В. В. Подгаецкий и др.* // *Автомат. сварка.* — 1956. — № 1. — С. 3–20.
46. *Любовский К. В.* Металлургия сварки плавлением. Справочник по сварке // *Под ред. Е. В. Соколова.* — Т. 1. — М.: Машгиз, 1960. — С. 51–138.
47. *Сварочные флюсы и шлаки* // *Сб. докл. междунар. семинара, Николаев, сент. 1974 г.* // *Под ред. Б. Е. Патона.* — Киев: Наук. думка, 1974. — 164 с.
48. *Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г.* Сварочные шлаки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 252 с.
49. *Потанов Н. Н.* Состояние и перспективы развития флюсового производства // *Свароч. пр-во.* — 1997. — № 9. — С. 34–36.
50. *Флюс*, ограничивающий содержание водорода в сварном шве // *И. А. Гончаров, В. С. Токарев, А. П. Пальцевич, В. Г. Кузьменко* // *Сб. докл. I Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Состояние и перспективы развития сварочных материалов в странах СНГ», Краснодар, 23–26 июня 1998 г.* — М., 1988. — С. 164–167.
51. *Гончаров И. А., Пальцевич А. П., Токарев В. С.* О новом подходе к предупреждению пористости при сварке под плавными флюсами // Там же. — С. 191.
52. *Кузьменко В. Г.* Термодинамічні та структурні аспекти вибору складів флюсів для електродугового зварювання: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук // *ІЕЗ ім. Е. О. Патона.* — Київ, 2002. — 33 с.
53. *Гончаров І. О.* Розробка низьководневих зварювальних флюсів марганцевосилікатного типу: Автореф. дис. ... канд. техн. наук // *ІЕЗ ім. Е. О. Патона.* — Київ, 2002. — 18 с.
54. *Походня И. К.* Сварка и родственные процессы на выставке в Эссене. Сварочные материалы // *Автомат. сварка.* — 2002. — № 1. — С. 29–32.
55. *Результаты* сравнительных испытаний плавящихся и керамических флюсов, применяемых при сварке стали 12ХН2МДФ // *И. К. Походня, Д. М. Кушнерев, С. Д. Устинов и др.* // Там же. — 1987. — № 11. — С. 61–64, 68.
56. *Походня И. К., Головки В. В.* Флюсы для сварки низколегированных высокопрочных сталей, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона // *Сварщик.* — 1999. — № 1. — С. 8–9.
57. *Агломерированные флюсы* для автоматической сварки высокопрочных и хладостойких сталей и технология их производства, разработанные ЦНИИКМ «Прометей» // *А. В. Баранов, Л. В. Грищенко, А. П. Барышников и др.* // *Сб. докл. II Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Дуговая сварка. Материалы и качество на рубеже XXI века», г. Орел, 4–8 июня 2001 г.* — Орел, 2001. — С. 109–110.
58. *Лакомский В. И.* Плазменно-дуговой переплав // *Под ред. Б. Е. Патона.* — Киев: Техніка, 1974. — 336 с.

Data are presented on modern production and consumption of steel in different regions of the world. Advance of mechanical engineering, shipbuilding, construction and other industries will require reduction of the weight of welded structures, improvement of their reliability and fatigue life, and lowering of power consumption in welding operations. The above problems can be solved by using high-strength low-alloyed (HSLA) steels in critical structures. Data are given on the status of metallurgy and technology of welding HSLA steels in Russia and Ukraine. Problems of welding HSLA steels and tendencies of their development are analysed, and areas of further research are outlined. Level of development of general-purpose consumables is considered and recommendations on their improvement are given.

Поступила в редакцию 15.11.2002