

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ МАРОК 10X12М, 10X9МФБА, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Л. А. КРАВЧУК, Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

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

В развитии работ по технологии электронно-лучевой сварки специальных сталей проведены исследования свойств соединений жаропрочных сталей марок 10X12М и 10X9МФБА толщиной $\delta_m = 30$ мм, выполненных одно- и многопроходной электронно-лучевой сваркой горизонтальным электронным пучком на скорости $v_{св} = 3$ мм/с без предварительного подогрева. Приведены результаты механических испытаний сварных соединений на разрыв и ударную вязкость, а также характер разрушения после электронно-лучевой сварки и после нее с последующим отпуском. Установлено, что вязкость и пластичность сварных соединений обеих жаропрочных сталей после первого основного прохода и после второго прохода при электронно-лучевой сварке с последующим отпуском сохраняются практически на одном уровне. Разрушение сварных соединений образцов обоих сплавов, ориентированных поперек металла шва, происходит по основному металлу вдали от шва, вне зоны термического влияния. Поверхность излома матовая. Образовавшийся рельеф имеет характерные признаки пластического разрушения. В результате отпуска прочность сварных соединений обоих сплавов снижается незначительно, а вязкость и пластичность повышаются. Третий по счету проход при электронно-лучевой сварке приводит к образованию в структуре шва и околошовной зоны дефектов в виде срединных трещин и хрупких малопластичных структур. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, жаропрочные стали, сварные соединения, скорость сварки, подогрев, отпуск, прочность, вязкость, относительное удлинение, относительное сужение, количество проходов

Одним из решающих факторов, влияющих на темп нарастания растягивающих напряжений при кристаллизации шва и стойкость металла сварного соединения против образования продольных горячих трещин в середине шва, является погонная энергия сварки. Как показано в работе [1], электронно-лучевая сварка (ЭЛС) жаропрочных сталей мартенситно-ферритного класса марок 10X12М и 10X9МФБА толщиной $\delta_m = 30$ мм без предварительного подогрева должна выполняться на скорости $v_{св} \leq 3$ мм/с, что соответствует погонной энергии 2,56 кДж/мм. При увеличении скорости ЭЛС по оси шва на линии стыковки кристаллитов, растущих навстречу друг другу от противоположных боковых границ литой зоны, появляются продольные кристаллизационные трещины («срединные» трещины) высотой 2...15 и шириной 0,05...0,2 мм. Кроме того, с увеличением ширины шва, а также при наличии на нем локальных расширений с нарастанием растягивающих напряжений при кристаллизации шва вероятность образования срединных трещин существенно возрастает [2–7]. Для предотвращения образования трещин необходимо обеспечить формирование более узких швов с равномерной шириной по глубине проплавления.

В настоящей работе исследованы механические свойства и характер разрушения сварных соединений жаропрочных сталей марок 10X12М и 10X9МФБА, выполненных одно- и многопроходной ЭЛС без предварительного подогрева.

Контроль качества и прочностных свойств сварных соединений жаропрочных сталей 10X12М и 10X9МФБА после ЭЛС на скорости $v_{св} \leq 3$ мм/с может быть выполнен путем проведения механических испытаний в соответствии с ГОСТ 6996–66. Для определения статических и динамических характеристик сварных соединений данный стандарт устанавливает формы и размеры образцов и порядок механических испытаний.

Образцы сварных соединений жаропрочных сталей 10X12М и 10X9МФБА испытывали в исходном состоянии и после отпуска. На результат отпуска оказывают влияние температура и скорость нагрева, время выдержки и скорость охлаждения. Температуру нагрева выбирали исходя из условия восстановления пластичности и вязкости околошовной зоны жаропрочных сталей с мартенситной структурой и шва до значений, близких к основному металлу. С повышением температуры отпуска твердость и предел прочности стали понижаются, а вязкость и пластичность возрастают. Время выдержки зависит от толщины образца, исходной структуры и химического состава стали. Таким образом, оптималь-

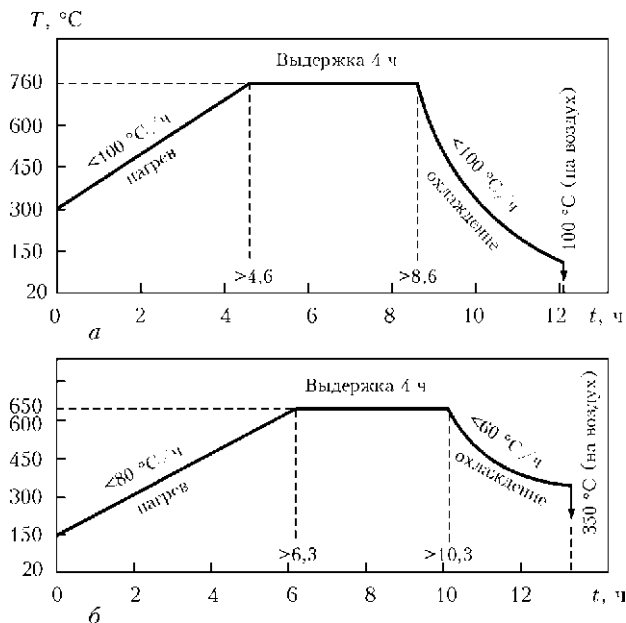


Рис. 1. Диаграмма отпуска сварных образцов из жаропрочной 10X9MFB (а) и 10X12M (б) сталей (t — продолжительность отпуска)

ные режимы отпуска жаропрочных сталей 10X12M и 10X9MFB для получения требуемых механических параметров сварных соединений не могут быть одинаковыми. Как видно из рис. 1, диаграммы отпуска сварных образцов исследуемых сплавов отличаются по температуре, скорости нагрева и скорости охлаждения.

Испытания сварных соединений жаропрочных сталей 10X12M и 10X9MFB на разрыв на цилиндрических образцах гантельного типа с диаметром рабочей части $d_0 = 6$ мм проводили после ЭЛС и после ЭЛС с последующим отпуском на

следующем режиме: $U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} = 128$ мА, $v_{\text{св}} = 3$ мм/с, $-\Delta I_{\text{ф}} = 15$ мА, $d_{\text{круг}} = 1,5$ мм, $l_{\text{раб}} = 200$ мм. Образцы для испытаний вырезали на половине глубины проплавления заготовок толщиной $\delta_{\text{м}} = 30$ мм при сварке горизонтальным электронным пучком и перемещении электронно-лучевой пушки в горизонтальной плоскости. Как видно из рис. 2, образцы обоих сплавов после ЭЛС и после ЭЛС с последующим отпуском, ориентированных поперек металла шва, разрушаются по основному металлу вдали от шва, вне зоны термического влияния (ЗТВ): для образцов после ЭЛС — на расстоянии 9...10 мм от оси шва, для образцов после ЭЛС с последующим отпуском — на расстоянии 6...6,5 мм от оси шва. Образовавшийся рельеф в месте разрушения носит «ямочный» характер и имеет характерные признаки пластического разрушения: поверхность излома расположена наклонно (приблизительно под углом 45°) по отношению к направлению нормальных напряжений, поверхность излома матовая, края разрушенного участка значительно деформированы. В результате испытаний на разрыв, кроме величины $\sigma_{\text{в}}$, были определены также другие параметры сварного соединения: $\sigma_{0,2}$, δ , ψ .

Для контроля динамических характеристик сварных соединений и правильности выбора технологии сварки были проведены испытания металла шва и металла отдельных участков околошовной зоны на ударный изгиб (на надрезанных образцах). Испытания проводили с использованием образцов сечением 10×10 мм с полукруглым профилем надреза для металла шва и V-образным профилем надреза для линии сплавления с ос-

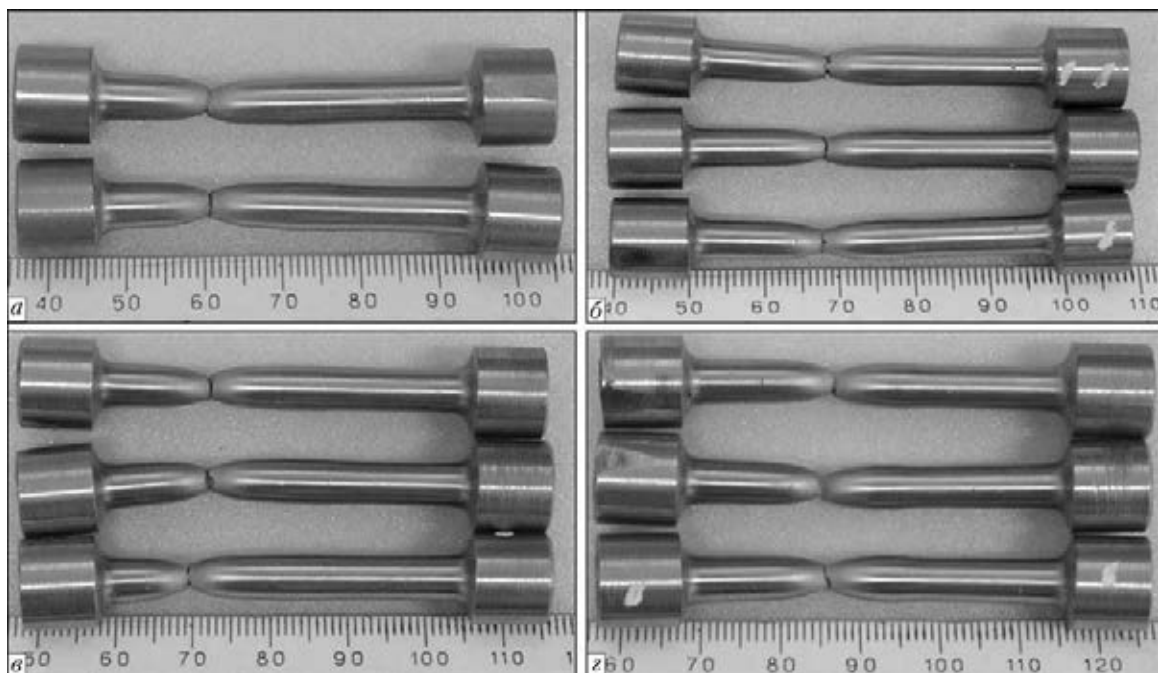


Рис. 2. Образцы после механических испытаний на разрыв сварных соединений из жаропрочной стали 10X12M (а, б) и 10X9MFB (в, г) после ЭЛС (а, в), ЭЛС и последующего отпуска (б, г)

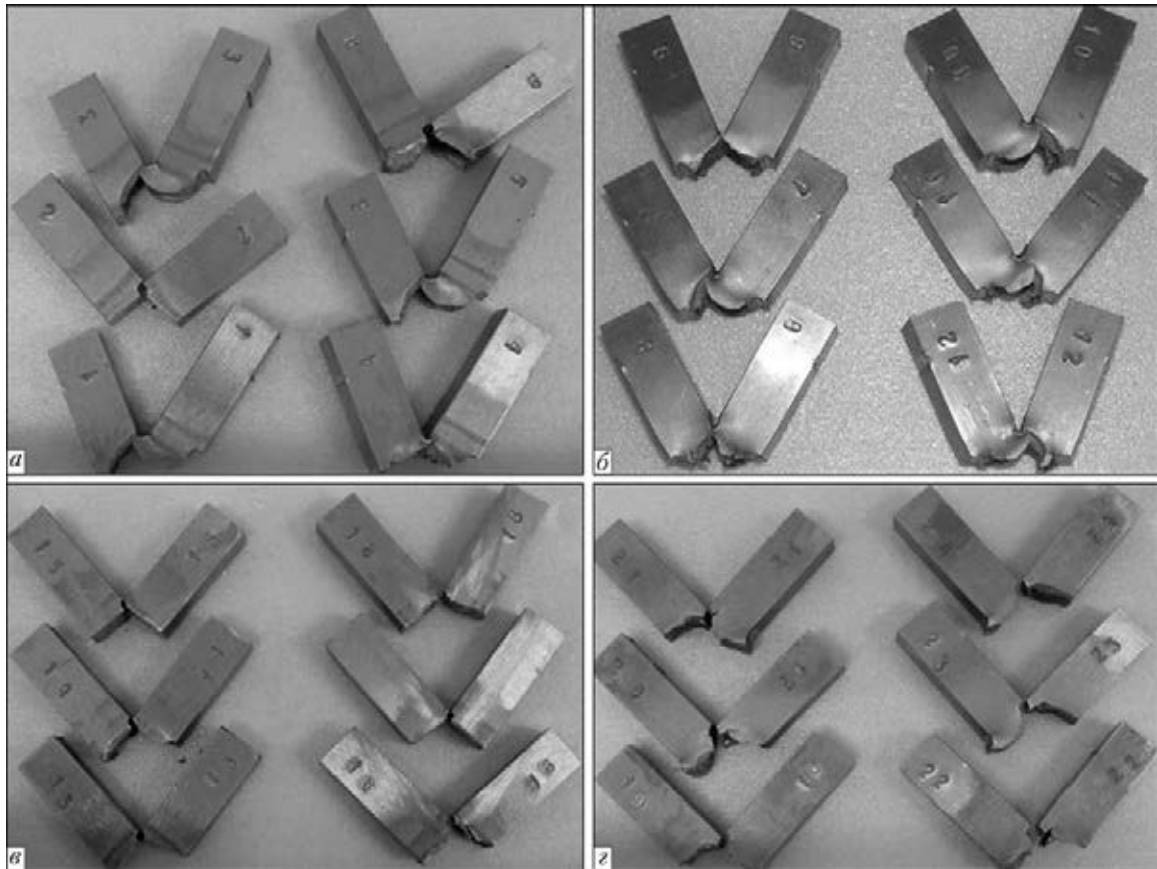


Рис. 3. Образцы после механических испытаний на ударную вязкость сварных соединений из жаропрочной стали 10X12M (а, б) и 10X9МФБА (в, г): а — после ЭЛС (1–3 — изгиб по оси шва; 4–6 — изгиб по линии сплавления); б — после ЭЛС и последующего отпуска (7–9 — изгиб по оси шва; 10–12 — изгиб по линии сплавления); в — после ЭЛС (13–15 — изгиб по оси шва; 16–18 — изгиб по линии сплавления); г — после ЭЛС и последующего отпуска (19–21 — изгиб по оси шва; 22–24 — изгиб по линии сплавления)

новным металлом. Как видно на рис. 3, а, б, все образцы из жаропрочной стали 10X12M после ЭЛС и после ЭЛС с последующим отпуском изгибаются в процессе испытания на ударную вязкость в основном без полного разрушения; при неполном разрушении образовавшийся рельеф носит «ямочный» характер и имеет признаки пластического разрушения. Образцы после механических испытаний на ударную вязкость сварных соединений из жаропрочной стали 10X9МФБА (рис. 3, в, г) после ЭЛС и после ЭЛС с последующим отпуском изгибаются с полным разрушением, поверхность излома матовая, образовавшийся рельеф имеет признаки пластического разрушения.

Полученные данные механических свойств сварных соединений жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА после ЭЛС и после ЭЛС с последу-

ющим отпуском представлены в табл. 1. В результате отпуска прочность сварных соединений (σ_B , $\sigma_{0,2}$) снижается, а вязкость и пластичность (KCU , KCV , ψ) повышаются. При этом влияние отпуска на механические свойства сварных соединений жаропрочной стали 10X9МФБА сказывается сильнее, что может быть обусловлено большим количеством легирующих элементов.

Пластичность испытанных образцов, оцениваемая значением относительного сужения, для жаропрочной стали 10X12M составляет 68, для стали 10X9МФБА — 73 %.

С целью отработки ремонтной технологии ЭЛС жаропрочных сталей, исправления внутренних дефектов сварных соединений и оценки изменения формы и размеров зоны проплавления, а также прочностных характеристик были проведены исследования по влиянию двух- и трех-

Таблица 1. Механические свойства сварных соединений жаропрочных сталей 10X12M (числитель) и 10X9МФБА (знаменатель)

| Состояние металла | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | ψ , % | KCU , Дж/см ² (шов) | KCV , Дж/см ² (линия сплавления) |
|---|------------------|----------------------|------------|----------------------------------|---|
| После сварки | 739/721,9 | 584,6/653 | 67/71 | 121,6/216,8 | 101,3/183,2 |
| После сварки и термической обработки (отпуск при 650 °С, 4 ч) | 730/677,8 | 564/536,4 | 68/73 | 163,0/302,6 | 151,2/296,6 |



Таблица 2. Механические свойства сварных соединений жаропрочных сталей 10X12M (числитель) и 10X9МФБА (знаменатель) при температуре +20 °С в зависимости от количества проходов при ЭЛС

| Количество проходов при ЭЛС | σ_v , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | ψ , % | KCV, Дж/см ² (линия сплавления) |
|-----------------------------|------------------|----------------------|------------|--|
| Два прохода + отпуск | 728,4/660,0 | 562,4/524,6 | 66/71,5 | 188,3/222,0 |
| Три прохода + отпуск | 718,0/664,0 | 552,0/522,4 | 70/70,6 | 10,2*/37,2** |

* На образце из стали 10X12M с тремя проходами имеет место дефект в виде срединной трещины.
 ** На образце из стали 10X9МФБА с тремя проходами имеет место хрупкое разрушение.

кратных переплавов одного и того же шва. Подготовка и испытания образцов со сварными соединениями проводили по описанной выше методике. Перед вторым и третьим проходами во избежание влияния сопутствующего подогрева на формирование лицевого и обратного валиков шва выполняли выдержку во времени для остывания образца до комнатной температуры. Для обеспечения точности попадания сварочного электронного пучка по оси шва положение образца и программу сварки сохраняли неизменными. Установлено, что такая последовательность в выполнении двух- и трехкратных переплавов одного и того же шва не влияет на изменение формы и размеров зоны проплавления, а ширина лицевого и обратного валиков шва остается практически постоянной. Разрушение образцов гантельного типа обеих сталей после двух- и трехкратных переплавов одного и того же шва с последующим отпуском происходит по основному металлу вдали от шва, вне ЗТВ. Образовавшийся рельеф в месте разрушения имеет характерные признаки пластического разрушения.

Полученные данные механических свойств сварных соединений на жаропрочных сталях 10X12M и 10X9МФБА при температуре испытаний +20 °С в зависимости от количества проходов сварочным электронным пучком с последующим отпуском представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, вязкость и пластичность сварных соединений (KCV, ψ) обеих сталей после второго прохода и последующего отпуска сохраняются на уровне вязкости и пластичности сварных соединений после первого прохода (см. табл. 1). Следует отметить, что образцы после механических испытаний на ударную вязкость сварных соединений после второго прохода с последующим отпуском из жаропрочной стали 10X12M изгибаются с разрушением по линии сплавления полностью, а жаропрочной стали 10X9МФБА изгибаются с разрушением по линии сплавления, но образцы остаются цельными.

Как видно из табл. 2 механические свойства сварных соединений жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА резко ухудшаются после третьего прохода с последующим отпуском. Ударная вязкость образцов из жаропрочной стали 10X12M KCV = 10,2 Дж/см², что обусловлено образованием дефекта в виде срединной трещины. Значение ударной вязкости образцов из жаропрочной стали 10X9МФБА составило KCV = 37,2 Дж/см² и связано с образованием хрупких структур по линии сплавления.

Таким образом, при ЭЛС жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА допускается только один проход после первой основной сварки, так как он не приводит к ухудшению механических свойств сварных соединений. Вязкость и пластичность сварных соединений обеих жаропрочных сталей после второго прохода при ЭЛС и последующего отпуска сохраняются на уровне вязкости и пластичности сварных соединений после первого основного прохода.

1. *Формирование сварных швов при электронно-лучевой сварке жаропрочных сталей марки 10X12M и 10X9МФБА толщиной 30 мм / В. М. Нестеренков, Л. А. Кравчук, Ю. А. Архангельский, А. А. Бондарев // Автомат. сварка. — 2013. — № 6. — С. 39–43.*
2. *Effect of welding parameters and prevention of defects in deep penetration EBW of heavy section steel / T. Shida, H. Kita, H. Okamura, Y. Kawada. — S.I., S.a. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-239–78).*
3. *Кошелев Ю. В., Ковбасенко С. Н. Ширина шва как критерий образования горячих трещин при электроннолучевой сварке // Междунар. конф. по электроннолучевым технологиям. — Варна, 26 мая– 2 июня 1985 г. — София, 1985. — С. 223–228.*
4. *Касаткин Б. С., Ковбасенко С. Н., Нестеренко В. И. Однопроходная электроннолучевая сварка конструкционных сталей больших толщин // Автомат. сварка. — 1989. — № 4. — С. 18–27.*
5. *Патон Б. Е., Лесков Г. И., Живага Л. И. Специфика образования шва при электроннолучевой сварке // Там же. — 1976. — № 3. — С. 1–5.*
6. *Морочко В. П., Сорокин Л. И., Зорин Н. Я. Влияние режима электроннолучевой сварки на форму шва и свойства сварных соединений жаропрочных сплавов толщиной 10–15 мм // Свароч. пр-во. — 1975. — № 6. — С. 32–36.*
7. *Сорокин Л. И. Электронно-лучевая сварка жаропрочных сплавов // Там же. — 1998. — № 5. — С. 9–15.*

Поступила в редакцию 13.06.2013