



# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СВАРКИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ С ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЕМ

А. М. САВИЦКИЙ, канд. техн. наук, М. М. САВИЦКИЙ, д-р техн. наук, Д. П. НОВИКОВА, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе анализа зависимости условий нагрева и охлаждения сварных соединений показано, что основными параметрами режима сварки, от которых зависит эффективность термоциклирования, являются скорость сварки и длительность паузы. Эти параметры режима определяют скорость нагрева, количество циклов нагрев-охлаждение и интервал термоциклирования, от которых, в свою очередь, зависит кинетика протекания структурных превращений при нагреве и охлаждении сварного соединения.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, закаливающиеся стали, тепловая мощность, термоциклирование, структура

Важным фактором, определяющим свойства металла сварных соединений, является его структура. Особенно резко эта зависимость проявляется при сварке закаливающих сталей. Поэтому изучение особенностей влияния различных факторов на формирование структуры при сварке указанной группы сталей является важной и актуальной задачей, так как позволяет разрабатывать новые перспективные методы ее улучшения.

Известно, что доминирующее влияние на кинетику формирования структуры металла оказывают условия его нагрева и охлаждения. Особенности этого влияния при традиционных способах сварки изучены достаточно глубоко и всесторонне [1–5]. Условия нагрева и охлаждения при традиционных способах определяются погонной энергией. Ее уменьшение сопровождается ускорением нагрева и охлаждения сварных соединений, что способствует ограничению роста аустенитного зерна и повышению склонности сварных соединений к закалке. С увеличением погонной энергии скорость нагрева и охлаждения сварного соединения снижается. В результате наблюдается рост зерна и различная степень самоотпуска мартенсита.

При традиционных способах дуговой сварки сложно обеспечить одновременное измельчение зерна и снижение вероятности образования закалочных структур. Это достаточно трудоемко, дорого и нетехнологично. Поэтому в последнее время разработан ряд технологических приемов, обеспечивающих возможность сварки закаливающих сталей без подогрева. Одним из них является термоциклирование.

В работе [6] приведены результаты дилатометрических исследований, свидетельствующие о том, что термоциклирование позволяет смещать распад аустенита в более высокотемпературные области и подавлять мартенситное превращение в

сварном соединении. При этом в металле формируются структуры, являющиеся результатом распада аустенита в промежуточной либо диффузионной областях. Это достижимо при импульсно-дуговой однопроходной сварке без подогрева и термообработки сварного соединения за счет инициирования в нем специфического пульсирующего термического цикла по типу приведенного в работе [6]. Повышение скоростей нагрева, увеличение количества циклов нагрев-охлаждение и расширение температурного интервала термоциклирования при этом способствуют смещению распада аустенита в более высокотемпературные области и формированию в сварном соединении более пластичных структур.

Основными параметрами пульсирующего термического цикла, определяющими кинетику формирования структуры в сварном соединении, являются скорость нагрева, количество циклов нагрев-охлаждение, температурный интервал термоциклирования и скорость охлаждения. Так как влияние скоростей охлаждения на формирование структуры изучено достаточно глубоко, то рассматривать его нецелесообразно. Каждому из указанных параметров термического цикла соответствует определенный параметр режима сварки, который оказывает на него доминирующее влияние.

Скорость нагрева в основном определяется погонной энергией сварки, которая, в свою очередь, при фиксированном значении тепловой мощности дуги регулируется скоростью сварки [7, 8]. Следовательно, скорость нагрева при фиксированной тепловой мощности дуги в импульсе в основном определяется скоростью сварки в импульсе и возрастает по мере ее увеличения. Температурный интервал термоциклирования определяется длительностью паузы. Количество циклов нагрев-охлаждение зависит от двух параметров: скорости сварки в импульсе и длительности импульса. При минимальной длительности импульса возможно увеличение количества циклов нагрев-охлаждение при различных скоростях сварки в импульсе.

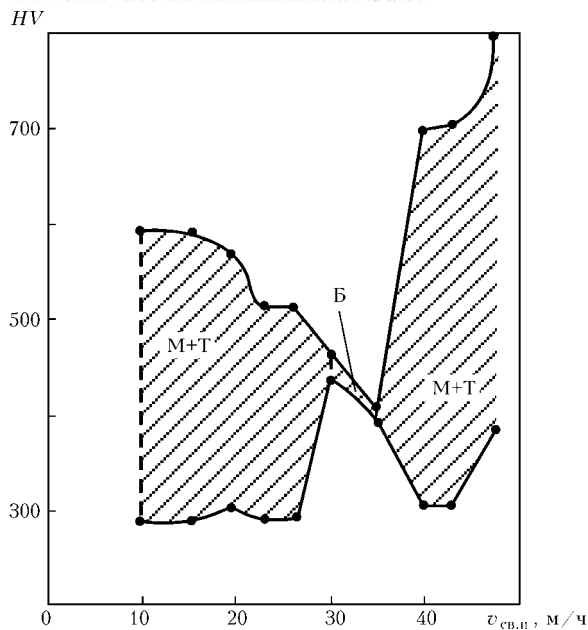


Рис. 1. Влияние скорости сварки в импульсе на фазовый состав и микротвердость структурных составляющих в металле ЗТВ сварных соединений стали М72, выполненных сваркой с термоциклированием: М – мартенсит; Б – бейнит; Т – троостит

Минимальная длительность импульса зависит от инерционности подающего механизма и, как показал практический опыт, колеблется в пределах 0,5... 1,5 с в зависимости от конструкции механизма подачи. При сварке с термоциклированием целесообразно поддерживать минимальную длительность импульса. При фиксированной длительности импульса можно считать, что количество циклов нагрев–охлаждение определяется скоростью сварки в импульсе. Основной задачей настоящей работы являлось изучение влияния этих параметров на кинетику формирования структуры сварного соединения. Исследования проводили на сварных образцах из стали М72 (до 0,78 % С) толщиной до 20 мм. Сварку выполняли проволокой 65Г диаметром 1,6 мм. Ток в импульсе изменялся в пределах 150... 400 А, напряжение в импульсе – 24... 34 В. Исследования выполняли в два этапа. На первом изменяли скорость сварки в импульсе при фиксированной тепловой мощности дуги в импульсе. Сварочную ванну подвергали периодически полной кристаллизации. На втором этапе изменяли

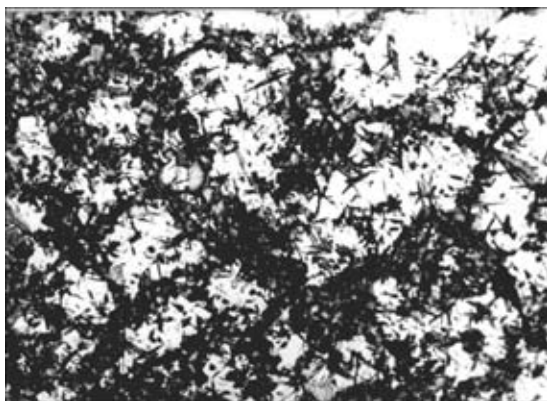


Рис. 2. Мартенситно-трооститная структура в металле ЗТВ сварных соединений стали М72, выполненных сваркой с термоциклированием,  $\times 240$

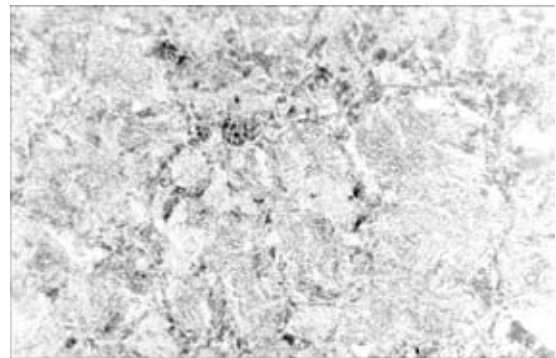


Рис. 3. Бейнитная структура в металле ЗТВ сварных соединений стали М72, выполненных сваркой с термоциклированием,  $\times 400$

длительность паузы при фиксированных значениях остальных параметров режима. Микротвердость структурных составляющих определяли по  $HV_{0,2}$ .

Результаты первого этапа исследований приведены на рис. 1–4. Как видно из рис. 1, при скоростях сварки в импульсе от 9,8 до 30 м/ч в металле ЗТВ формируется структура, состоящая из мартенсита и троостита (рис. 2). Наличие в структуре трооститной составляющей свидетельствует о достаточно высоком уровне неомогенности части аустенита и снижении его устойчивости при переохлаждении. В результате он распадается в температурной области диффузионного превращения. Микротвердость троостита колеблется вблизи  $HV 300$ .

Часть аустенита успевает гомогенизироваться. В результате возрастает его устойчивость при переохлаждении, а распад смещается в область бездиффузионного превращения с образованием мартенсита. По мере повышения скорости сварки микротвердость мартенсита постепенно снижается. Так, если при  $v_{св.и} = 9,8 \text{ м/ч}$  микротвердость составляет  $HV 593$ , то увеличение  $v_{св.и}$  до 19,4 м/ч сопровождается снижением ее до  $HV 566$ , а при  $v_{св.и} = 26 \text{ м/ч}$   $HV 513$ . Это свидетельствует о постепенном повышении температуры мартенситного

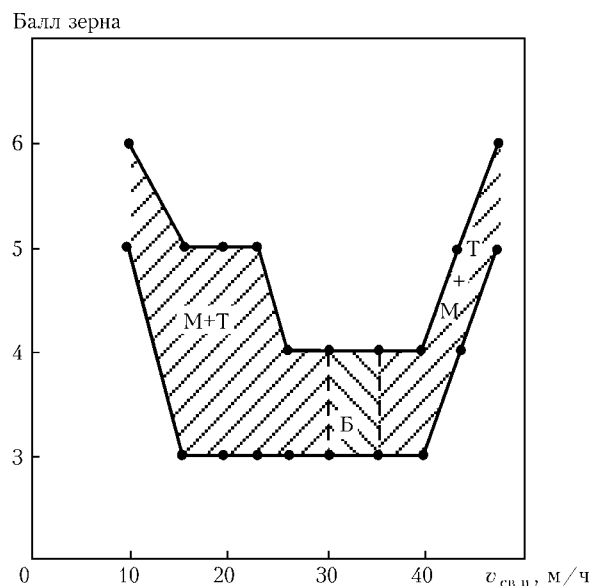


Рис. 4. Влияние скорости сварки в импульсе на размеры зерна в металле ЗТВ сварных соединений стали М72, выполненных сваркой с термоциклированием



превращения. Следовательно, по мере повышения скорости сварки от 9,8 до 26 м/ч уровень гомогенности аустенита постепенно снижается и его распад смещается в более высокотемпературные области.

В интервале скоростей 30...35 м/ч достигаются условия, когда весь аустенит имеет достаточно высокий уровень негомогенности и низкую устойчивость при переохлаждении. Этого достаточно, чтобы инициировать его распад в промежуточной области с образованием бейнита (рис. 3). С увеличением скорости сварки в импульсе от 30,3 до 35,2 м/ч микротвердость бейнита снижается от HV 441...460 до HV 396...412. Следовательно, температуры начала и конца распада аустенита постепенно повышаются, а незначительное различие между максимальной и минимальной микротвердостью подтверждает то, что различие между этими температурами также невелико, т. е. аустенит имеет примерно одинаковый уровень негомогенности, который постепенно повышается по мере увеличения скорости сварки от 30,3 до 35,2 м/ч.

Дальнейшее увеличение скорости сварки более 35,2 м/ч негативно отражается на кинетике формирования структуры в металле ЗТВ. Это подтверждает мартенситно-трооститная структура, в которой по мере повышения скорости сварки увеличивается количество мартенсита и резко возрастает разница между минимальной и максимальной микротвердостью структурных составляющих. При  $v_{св.и} = 39,5$  м/ч максимальная микротвердость (мартенсита) HV 700, а минимальная (троостита) HV 303. Увеличение скорости сварки в импульсе до 47 м/ч сопровождается ростом максимальной микротвердости до HV 793, а минимальной до HV 386. Следовательно, по мере увеличения скорости сварки свыше 35,2 м/ч уровень распада аустенита постепенно смещается в низкотемпературные области, где нет даже условий для развития самоотпуска продуктов бездиффузионного распада. Это обусловлено особенностями термического цикла сварки.

При сварке с термоциклированием кинетика формирования структуры зависит от сочетания скоростей нагрева, количества циклов нагрев-охлаждение и температурного интервала термоциклирования. Чем выше скорости нагрева, больше циклов нагрев-охлаждение и шире интервал термоциклирования, тем выше температуры начала и конца распада аустенита. По мере увеличения скорости сварки в импульсе увеличиваются скорости нагрева, но уменьшается количество циклов нагрев-охлаждение. Для каждого конкретного значения тепловой мощности дуги существуют пороговые скорости сварки в импульсе, при которых количество циклов нагрев-охлаждение настолько мало, что они уже практически не оказывают на кинетику формирования структуры никакого влияния. Поэтому после превышения такого порога распад аустенита может смещаться в область более низких температур с образованием мартенситной составляющей.

Диаграмма на рис. 4 позволяет оценить влияние скорости сварки в импульсе на размеры зерна в металле ЗТВ. Видно, что по мере повышения ско-

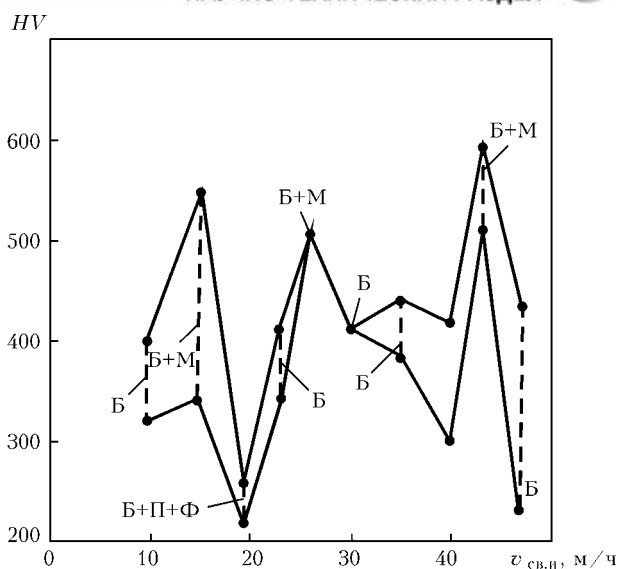


Рис. 5. Влияние скорости сварки в импульсе на фазовый состав и микротвердость структурных составляющих в металле шва сварных соединений стали М72, выполненных сваркой с термоциклированием проволокой 65Г: Ф – феррит; П – перлит

рости сварки в импульсе от 9,8 до 26 м/ч вторичное аустенитное зерно увеличивается в размерах соответственно от 5...6 до 3...4 баллов. В интервале скоростей 26,0...39,5 м/ч размеры зерна стабилизируются в рамках 3...4 баллов. Дальнейшее увеличение скорости сварки в импульсе сопровождается постепенным измельчением зерна до 5...6 баллов при  $v_{св.и} = 47$  м/ч.

Влияние скорости сварки в импульсе на структуру металла шва (рис. 5) аналогично таковому в металле ЗТВ. По мере увеличения скорости сварки в импульсе до 30,3 м/ч разница между максимальной и минимальной микротвердостью структурных составляющих в металле шва уменьшается. При  $v_{св.и} = 30,3$  м/ч структура металла постепенно трансформируется в чисто бейнитную с микротвердостью HV 412 и остается таковой до  $v_{св.и} = 35,2$  м/ч, но более неоднородной по микротвердости. Дальнейшее повышение скорости сварки сопровождается увеличением разницы между минимальной и максимальной микротвердостью структуры и появлением в ней мартенсита.

Результаты этих исследований достаточно хорошо коррелируют с данными работы [7], в которой изложены особенности влияния скорости сварки на термический цикл при термоциклировании. В соответствии с этой работой при постоянстве остальных параметров режима повышение скорости сварки до определенного значения способствует увеличению скоростей нагрева и проявлению пульсирующего характера термического цикла.

Первый этап исследований показал, что улучшение условий формирования структуры сварного соединения путем изменения одной только скорости сварки носит ограниченный характер. Хотя при этом удается добиваться подавления мартенситного превращения в шве и металле ЗТВ, но существенное измельчение зерна при этом весьма проблематично.

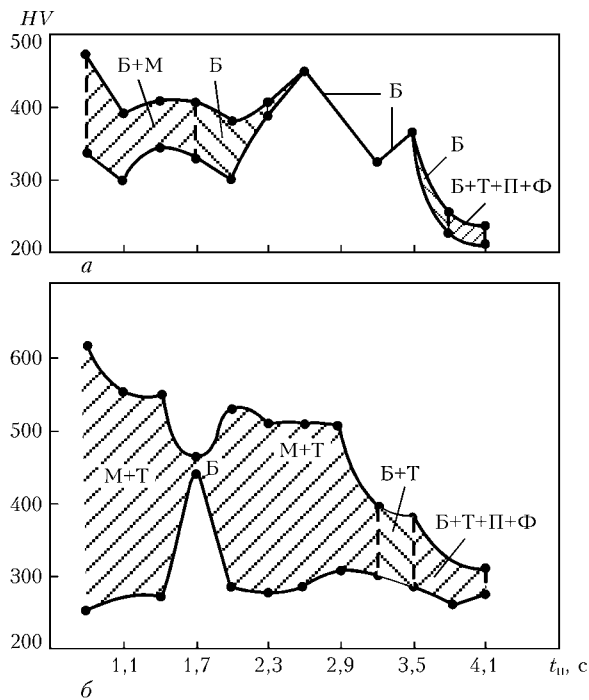


Рис. 6. Влияние длительности паузы на фазовый состав и микротвердость структурных составляющих сварных соединений стали М72, выполненных сваркой с термоциклированием проволокой 65Г: а — шов; б — металл ЗТВ

Дальнейшее улучшение структуры сварного соединения, как показал второй этап исследований, возможно за счет расширения температурного интервала термоциклирования, что достигается увеличением длительности паузы.

Наиболее приемлемые результаты на предыдущем этапе исследований получены при скорости сварки в импульсе 30,3 м/ч. Поэтому второй этап проводили при данном фиксированном ее значении. Результаты этих исследований представлены на рис. 6–8. Как видно из рис. 6, а, при длительности паузы до 1,7 с в шве формируется бейнитно-мартенситная структура с достаточно большой разницей между максимальной и минимальной микротвердостями структурных составляющих. По мере увеличения длительности эта разница постепенно уменьшается. При паузах 1,7...2,6 с в металле шва формируется бейнитная структура, микротвердость которой не превышает  $HV 460$ , а при паузе более 3,5 с микротвердость снижается до  $HV 300$  и ниже. Дальнейшее увеличение длительности

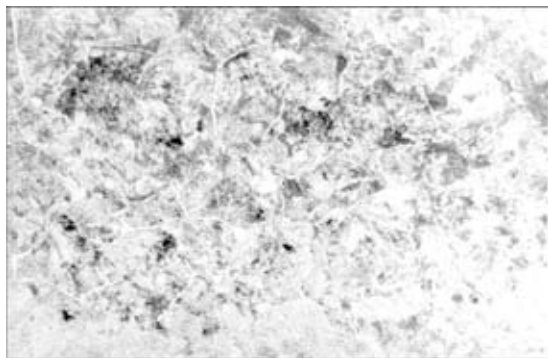


Рис. 7. Бейнитно-трооститно-перлитно-ферритная структура в металле ЗТВ сварных соединений стали М72, выполненных сваркой с термоциклированием,  $\times 400$

паузы до 3,8 с и более сопровождается формированием в металле шва смешанной бейнитно-трооститно-перлитно-ферритной структуры с микротвердостью  $HV 230...260$ , которая снижается по мере увеличения паузы.

Отмеченная выше закономерность справедлива и для металла ЗТВ (рис. 6, б). Максимальную микротвердость имеет структура, представляющая собой смесь мартенсита и троостита, которая формируется при длительности паузы 0,8 с. В данном случае максимальная микротвердость (мартенсита) превышает  $HV 600$ , а минимальная (троостита) не достигает  $HV 260$ . Это свидетельствует о том, что часть аустенита имела уровень гомогенности, что обеспечивало его распад в диффузионной области. Часть аустенита с более высоким уровнем гомогенности и повышенной устойчивостью при переохлаждении претерпела распад в мартенситной области, и, судя по микротвердости, при пониженных температурах. Мартенситно-трооститная структура в металле ЗТВ формируется вплоть до длительности паузы 3,2 с, за исключением паузы 1,7 с, при которой в металле ЗТВ формируется бейнитная структура с микротвердостью  $HV 441...460$ . Следовательно, по мере увеличения длительности паузы микротвердость мартенсита постепенно снижается, т. е. смещается мартенситное превращение в более высокотемпературные области и развивается самоотпуск продуктов превращения.

Увеличение длительности паузы до 3,2...3,5 с обеспечивает формирование в металле ЗТВ бейнитно-трооститной структуры с микротвердостью, которая колеблется в пределах  $HV 400$  (бейнит) и  $HV 300$  (троостит), постепенно снижаясь. При длительности паузы более 3,5 с в металле ЗТВ формируется бейнитно-трооститно-перлитно-ферритная структура (рис. 7). Микротвердость ее составляет  $HV 286...382$  и постепенно снижается до  $HV 276...312$  при паузе 4,1 с.

Увеличение длительности паузы обеспечивает постепенное смещение распада аустенита в более высокотемпературные области. При этом максимальная и минимальная микротвердости структурных составляющих постепенно снижаются, уменьшается и разница между ними.

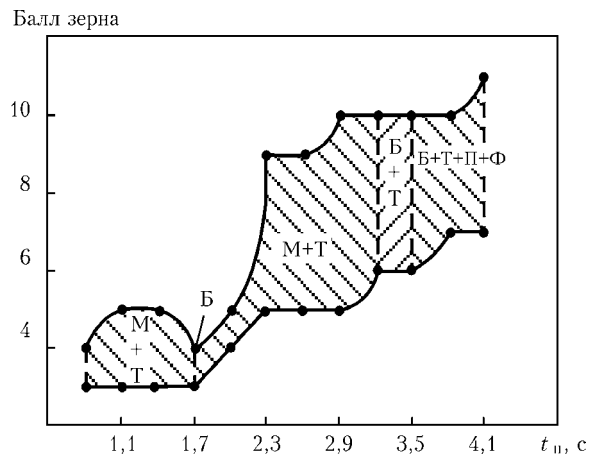


Рис. 8. Влияние длительности паузы на размеры зерна в металле ЗТВ сварных соединений стали М72, выполненных сваркой с термоциклированием



**Погонная энергия дуговой сварки при различной глубине проплавления**

Процесс сварки	Кратность увеличения глубины проплавления	$\delta$ , мм	$I$ , А	$U$ , В	$v_{св}$ , м/ч	$q$ , Дж/см
Без активации	—	10	550	40...42	25	24964
С активацией	1,8...2,0	10	400	34	40	9189
»»	2,0...2,5	10	300	30	30	8103
»»	3,0...4,0	10	220	25	36	4400

Важно отметить, что увеличение длительности паузы сопровождается измельчением вторичного аустенитного зерна (рис. 8). Например, при длительности паузы 1,7 с зерно соответствует 4...5 баллам по ГОСТ 5639–82. Увеличение паузы до 3,5 с сопровождается измельчением зерна до 6... 10 баллов с преобладанием более мелких зерен. При длительности паузы 4,1 с зерна измельчаются до 7...11 баллов, причем основная масса зерен соответствует 9... 11 баллам.

Данные второго этапа исследований свидетельствуют, что по мере увеличения длительности паузы и расширения температурного интервала термоциклирования примерно до 1400... 450 °С происходит снижение уровня гомогенности аустенита и его устойчивости при переохлаждении. В результате распад аустенита постепенно смещается в более высокотемпературные области, что обеспечивает формирование в сварном соединении более мягких и пластичных структур. При этом, в результате расширения температурного интервала термоциклирования измельчается и вторичное аустенитное зерно.

Таким образом, при одной и той же скорости сварки и тепловой мощности дуги в импульсе за счет изменения длительности паузы и регулирования температурного интервала термоциклирования в сварном соединении можно формировать структуры от мартенситных до бейнитно-перлитно-трооститных смесей. При этом следует учитывать, что длительности паузы, необходимые для смещения распада аустенита в области промежуточного и диффузионного превращений, могут быть достаточно большими. Чем больше погонная энергия, тем более длительной должна быть пауза. А это негативно отражается на производительности сварки. Поэтому в настоящее время стоит задача сокращения длительности паузы при одновременном повышении интенсивности периодического охлаждения сварного соединения. Одним из путей решения данной проблемы является снижение погонной энергии сварки, так как для охлаждения до определенной температуры при более низкой погонной энергии необходима меньшая длительность паузы. При традиционном подходе к ре-

шению этой проблемы будет снижаться и производительность сварки.

Решить задачу снижения погонной энергии без снижения производительности сварки позволяет активация дуги. В таблице приведены результаты экспериментов по оценке влияния глубины проплавления при сварке плавящимся электродом. Активация (за счет повышения проникающей способности дуги) позволяет снизить погонную энергию по сравнению с традиционными способами сварки. Как видим из таблицы, при сварке металла одинаковой толщины активация дуги снижает погонную энергию сварки в 2,7...6,7 раза.

**Выводы**

1. Увеличение скорости сварки в импульсе при фиксированных значениях остальных параметров режима и периодической кристаллизации сварочной ванны позволяет предотвращать мартенситное превращение в участке перегрева металла ЗТВ.
2. Изменение длительности паузы в пределах 0,8...4,1 с при неизменной скорости сварки позволяет регулировать температурный интервал термоциклирования и формировать в сварном соединении структуры от мартенситной до бейнитно-перлитно-мартенситных смесей.
3. Активация дуги по сравнению с традиционными способами сварки позволяет снизить погонную энергию при сварке металла одинаковых толщин и повысить интенсивность периодического охлаждения сварного соединения в паузе.

1. Макара А. М., Готальский Ю. Н. Исследование термического цикла околошовной зоны при электрошлаковой сварке в связи с задачей сварки закаливающихся сталей // Автомат. сварка. — 1955. — № 5. — С. 25–32.
2. Макара А. М., Малевский Ю. Б. Особенности распада переохлажденного аустенита в стали 30ХГСА при термическом цикле околошовной зоны // Там же. — 1954. — № 6. — С. 3–18.
3. Оптимальные термические циклы сварки сталей 14Х2ГМР и 14ХМНДФР / Б. С. Касаткин, В. Ф. Мусияченко, В. Г. Васильев и др. // Там же. — 1972. — № 4. — С. 14–17.
4. Касаткин Б. С., Волков В. В. Влияние последующего подогрева на стойкость сварных соединений стали 14Х2ГМР против образования трещин // Там же. — 1977. — № 12. — С. 39–41.
5. Сварка низколегированных высокопрочных сталей 14Х2ГМР и 14ХМНДФР / Б. С. Касаткин, В. Ф. Мусияченко, Л. И. Миходуй и др. // Там же. — № 6. — С. 39–42.
6. Особенности структуры и свойств в сварных соединениях, формируемых с термоциклированием / Д. А. Дудко, А. М. Савицкий, В. Г. Васильев, Д. П. Новикова // Там же. — 1996. — № 2. — С. 6–7.
7. Особенности тепловых процессов при сварке с термоциклированием / Д. А. Дудко, А. М. Савицкий, М. М. Савицкий, Е. М. Олейник // Там же. — 1998. — № 4. — С. 8–12.
8. Савицкий А. М., Савицкий М. М., Дудко Д. А. Влияние параметров режима сварки на скорость нагрева металла в околошовной зоне // Там же. — 2000. — № 11. — С. 21–24.

It is shown on the basis of analysis of the relationship between the heating and cooling conditions of the welded joints that the main welding parameters, upon which the efficiency of thermal cycling depends, are the welding speed and pause duration. These parameters determine the heating rate, number of heating and cooling cycles and thermal cycling interval, which, in turn, determine the kinetics of structural transformations in heating and cooling of a welded joint.

Поступила в редакцию 03.10.2003  
в окончательном варианте 29.04.2004