



ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БАНДАЖИРОВАННЫХ ОПОРНЫХ ВАЛКОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАПЛАВКЕ

В. В. ЧИГАРЕВ, В. И. ЩЕТИНИНА, доктора техн. наук, **С. В. ЩЕТИНИН**, канд. техн. наук,
К. К. СТЕПНОВ, Н. Г. ЗАВАРИКА, В. И. ФЕДУН, инженеры (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Установлены закономерности воздействия высокоскоростной электродуговой наплавки с низкой погонной энергией на сварочные напряжения и трещиностойкость наплавленного металла. Разработан способ высокоскоростной наплавки бандажированных опорных валков.

Ключевые слова: электродуговая наплавка, бандажированный опорный валок, углеродистая сталь, погонная энергия, деформации, сварочные напряжения, микроструктура, ударная вязкость, трещины, износостойкость

К основным деталям металлургического оборудования относятся прокатные валки, которые изготавливаются из высокоуглеродистых сталей и работают в условиях высокого удельного давления. Это ограничивает использование наплавки, особенно для бандажированных опорных валков, которые изготавливают путем посадки бандажа на ось с натягом. В результате в бандаже возникают напряжения, которые могут привести к поломке оборудования. В связи с этим наплавку бандажированных опорных валков обычно не выполняют.

Ресурс эксплуатации валков определяется их трещиностойкостью, износостойкостью, расходным коэффициентом, материалоемкостью процесса и себестоимостью проката. Поэтому его повышение является важной научно-технической проблемой.

С целью повышения трещиностойкости применяют высокоскоростную электродуговую наплавку [1] с низкой погонной энергией, для которой характерны изменения условий существования дуги, уменьшение тепловложения, увеличение скорости нагрева и охлаждения жидкого металла и зоны термического влияния (ЗТВ), что приводит к изменению условий кристаллизации ванны [2, 3], уровня деформаций, сварочных напряжений и качества наплавленного металла.

Данное влияние погонной энергии на трещиностойкость наплавленного металла противоречиво [2, 4, 5], а воздействие формы электрода и погонной энергии на деформации, сварочные напряжения и свойства наплавленного металла исследовано пока недостаточно.

Цель настоящей работы — изучение особенностей повышения трещиностойкости наплавленного металла и разработка способа высокоскоростной наплавки бандажированных опорных валков на низкой погонной энергии.

При электродуговой наплавке под действием теплового воздействия в структуре наплавленного металла возникают вакансии. В зоне их формирования происходит нарушение статического равновесия сил межатомного взаимодействия, обуславливающего смещение соседних атомов из их равновесных положений и микроискажение кристаллической решетки [2].

В результате тепловложения в процессе наплавки металл подвергается воздействию термодеформационного цикла, от которого зависит микроискажение кристаллической решетки и микронапряжения. Термодеформационный цикл определяли с помощью тензометра, в качестве которого использовали электронный микрометр, работающий на основе механотрона. Тензометром на базе 0,01 м измеряли наблюдаемые деформации ϵ_n и термический цикл нагрева точки, расположенной между охлаждаемыми ножками тензометра. Изменение уровня деформаций в процессе наплавки и термический цикл нагрева точки фиксировали с помощью осциллографа. Собственные деформации основного металла, расположенного на расстоянии $5 \cdot 10^{-3}$ м от зоны сплавления, определяли дифференциальным способом [6–8]:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{упр}} + \epsilon_{\text{пл}} = \epsilon_n - \epsilon_{\text{св}}$$

где $\epsilon_{\text{упр}}$, $\epsilon_{\text{пл}}$, $\epsilon_{\text{св}}$ — деформации соответственно упругости, пластичности и сварочные.

Наплавку ребра пластины размером $(30 \times 125 \times 400) \cdot 10^{-3}$ м выполняли с использованием составного электрода [9], состоящего из двух проволок и U-образной ленты, под керами-

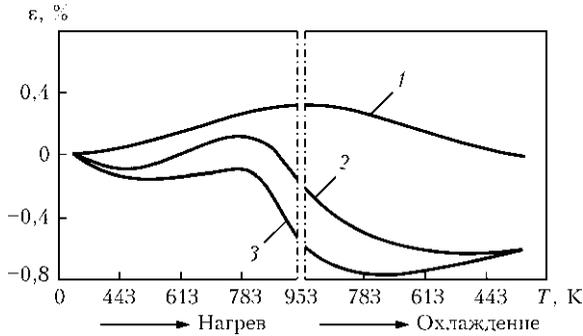


Рис. 1. Кривые термдеформационного цикла ЗТВ, полученные в направлении наплавки с использованием составного электрода ($q_3/v = 3,6$ МДж/м) на расстоянии $5 \cdot 10^{-3}$ м от зоны сплавления: 1 — свободные деформации; 2 — наблюдаемые; 3 — собственные

ческим флюсом ЖСН-5, который обеспечивает получение наплавленного металла типа 25Х5ФМС. Появление деформаций фиксировали в направлении наплавки. В результате измерения термдеформационных циклов (рис. 1) установлено, что в процессе наплавки сначала при приближении дуги происходит сжатие металла в зоне замера под действием расширяющегося металла, а когда дуга располагается в плоскости измерения термдеформационного цикла, имеет место расширение металла в зоне и его растяжение. По мере удаления дуги и охлаждения происходит сжатие основного металла. Как при нагреве, так и при охлаждении мгновенные значения ϵ_n и $\epsilon_{св}$ значительно отличаются, что приводит к развитию собственных деформаций ϵ и сварочных напряжений.

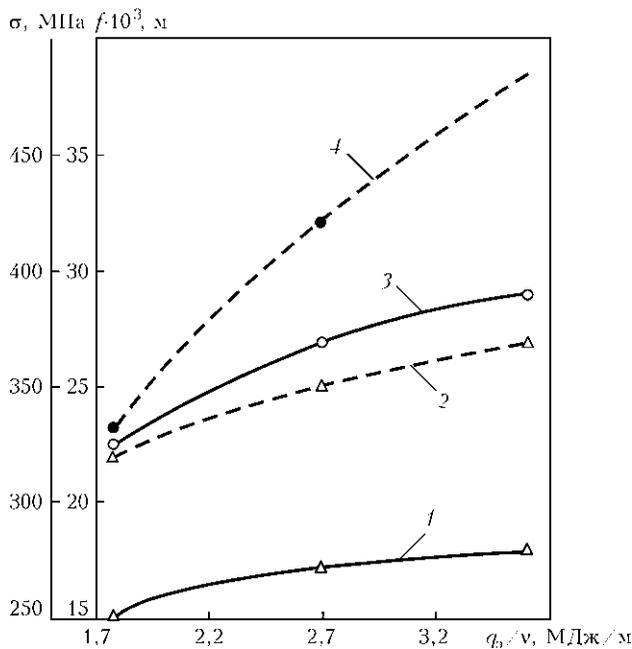


Рис. 2. Зависимость сварочных напряжений σ (3, 4) и деформаций f (1, 2) в пластинах размером соответственно $(8 \times 120 \times 900) \cdot 10^{-3}$ м (штриховые кривые) и $(30 \times 120 \times 900) \cdot 10^{-3}$ м (сплошные) от погонной энергии сварки

Для исследования влияния погонной энергии на деформации основного металла осуществляли сварку пластин размером $(8 \times 120 \times 900) \cdot 10^{-3}$ м и наплавку на пластины размером $(30 \times 120 \times 900) \cdot 10^{-3}$ м составным электродом с различной погонной энергией. Установлено, что при повышении скорости сварки и уменьшении погонной энергии вследствие сокращения тепловложения деформации основного металла и сварочные напряжения снижаются (рис. 2).

Зависимость сварочных напряжений от эффективной погонной энергии определяется из выражения [8]:

$$\sigma \geq \mu E \frac{q_3}{vF}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент Пуассона углеродистой стали; E — модуль упругости, равный $19,68 \cdot 10^4$ МПа; F — поперечное сечение пластины.

Деформация пластин зависит от сварочных напряжений

$$f = 0,613l \sqrt{\frac{\sigma - \sigma_{кр}}{E}}, \quad (2)$$

где l — длина пластины; $\sigma_{кр}$ — критическое значение сварочных напряжений, которые сварочных напряжений определяют по формуле

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{\delta}{l} \right)^2, \quad (3)$$

где δ — толщина пластины. При $\sigma > \sigma_{кр}$ происходит деформация пластины.

Из приведенных выше выражений следует, что сварочные напряжения зависят от деформации пластины

$$\sigma = \frac{f^2 E}{0,613^2 l^2} + \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{\delta}{l} \right)^2. \quad (4)$$

С уменьшением погонной энергии при увеличении скорости сварки сварочные напряжения снижаются (рис. 2), что значительно повышает трещиностойкость и ударную вязкость сварных соединений, которая качественно характеризует трещиностойкость и зависит от структуры наплавленного металла.

Влияние формы электрода и погонной энергии на структуру наплавленного металла устанавливали при пятислойной наплавке на пластины размером $(30 \times 300 \times 400) \cdot 10^{-3}$ м проволокой диаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м, лентой размером $(0,5 \times 45) \cdot 10^{-3}$ м, которую располагали в продольном и перпендикулярном направлении, и составным электродом. Наплавку выполняли под керамическим флюсом

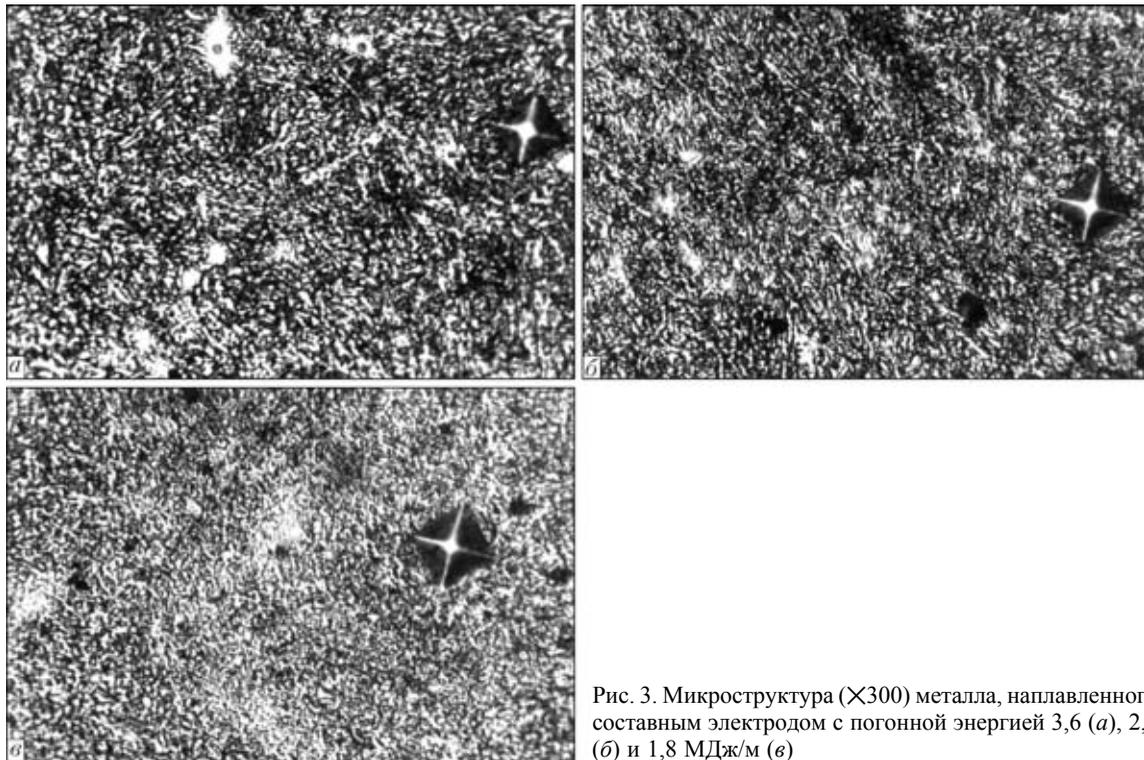


Рис. 3. Микроструктура ($\times 300$) металла, наплавленного составным электродом с погонной энергией 3,6 (а), 2,7 (б) и 1,8 МДж/м (в)

ЖСН-5 на оптимальных для каждого способа режимах. Наплавку проволочным электродом Св-08Г2С диаметром 4 мм осуществляли на режиме: ток 650...750 А; напряжение на дуге 31...33 В; скорость сварки $(0,56; 0,83 \text{ и } 1,10) \cdot 10^{-2}$ м/с. Наплавку составным электродом, состоящим из проволок Св-08Г2С диаметром 4 мм и ленты из стали 08кп сечением 0,5445 мм, выполняли на режиме: ток 1950...2050 А, напряжение на дуге 29...31 В; скорость сварки $(1,4; 2,1 \text{ и } 2,8) \cdot 10^{-2}$ м/с. Погонную энергию для каждого способа сварки изменяли в пределах $q_3/v = 1,8; 2,7$ и $3,6$ МДж/м.

Трещиностойкость наплавленного металла в значительной степени определяется сварочными напряжениями в нем, которые при наплавке суммируются. В связи с тем, что наплавку износостойкого слоя осуществляют за пять и более проходов, сварочные напряжения резко возрастают. Вследствие суммирования сварочных напряжений толщина наплавленного слоя ограничивается 25 мм, превышение этого значения вызывает существенное увеличение сварочных напряжений и образование отколов по зоне сплавления с основным металлом, что подтвердилось при наплавке горизонтальных валков стана 1700. Исследования производили при пятислойной наплавке. Свойства металла шва определяли путем изучения его структуры и измерения зоны отпуска и ударной вязкости сварных соединений.

Установлено, что при повышении скорости нагрева и охлаждения структура наплавленного металла измельчается, увеличиваются площадь контакта и межатомные силы связи, возрастает

трещиностойкость. При наплавке лентой, расположенной в продольном направлении, структура наплавленного металла крупнозернистая и неоднородная, в случае расположения ленты перпендикулярно структура измельчается незначительно и остается крупнозернистой. При наплавке проволочным и составным электродом также происходит измельчение структуры наплавленного металла, она становится мелкодисперсной и однородной и представляет собой ферритоцементитную смесь.

Аналогично измельчается структура наплавленного металла и ЗТВ при высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии (рис. 3) вследствие повышения скорости нагрева, охлаждения и кристаллизации пропорционально скорости наплавки. Из-за минимальных микроискажений кристаллической решетки, изменений микронапряжений, плотности дислокаций и мелкодисперсной однородной структуры повышается трещиностойкость, соединения, полученные на низкой погонной энергии, отличаются высокими ударной вязкостью и прочностными характеристиками.

Измерения ударной вязкости выполняли на сварных соединениях стали 09Г2С. Стали 9ХФ и 09Г2С имеют различные химический состав и склонность к образованию закалочных структур. Как при наплавке высокоуглеродистых сталей 9ХФ сложно избежать образования трещин, так и при сварке стали 09Г2С трудно обеспечить ударную вязкость, качественно характеризующую трещиностойкость.



При увеличении скорости сварки до 0,021 м/с и снижении погонной энергии до 2,7 МДж/м ударная вязкость сначала резко возрастает, а затем остается практически неизменной (рис. 4). При повышении скорости сварки увеличение ударной вязкости происходит вследствие измельчения структуры наплавленного металла, уменьшения искажений кристаллической решетки, микронапряжений и плотности дислокаций, с которыми связано зарождение трещин [10]. Аналогично ударной вязкости при этом же условии изменяются временное сопротивление, относительные удлинение и сужение. Высокие значения ударной вязкости, относительного удлинения и сужения свидетельствуют о повышенной трещиностойкости наплавленного металла.

Временное сопротивление разрыву при повышении скорости сварки и уменьшении погонной энергии возрастает. Его высокие значения, а также высокие значения ударной вязкости и относительного удлинения достигаются при погонной энергии 2,7 МДж/м и ниже, что подтверждают результаты экспериментов.

Аналогичные данные получены при исследовании влияния формы электрода и погонной энергии на статический излом (рис. 5) на образцах размером $(957, 5520) \cdot 10^{-3}$ м с V-образным надрезом. Определено, что максимальное значение статической нагрузки обеспечивается при значении погонной энергии 2,7 МДж/м и ниже.

При пятислойной наплавке под керамическим флюсом ЖСН-5 установлено, что с повышением ее скорости вследствие увеличения скорости ох-

лаждения и дисперсности структуры наплавленного металла его микротвердость возрастает. В ЗТВ микротвердость, измеренная микротвердометром ПМТ-3 с автоматическим нагружением, снижается (рис. 6). Размер зоны отпуска зависит от формы электрода. Минимальный ее размер характерен для наплавки лентой, расположенной перпендикулярно, что является следствием минимального тепловложения в боковые кромки ванны. При продольном расположении ленты размер зоны отпуска увеличивается. Применение проволоочного и составного электрода (рис. 6) увеличивает размер зоны отпуска в связи с увеличением тепловложения в боковые кромки ванны.

При повышении скорости наплавки в результате снижения погонной энергии размер зоны отпуска уменьшается (рис. 6), что согласуется с имеющимися данными [11]. Уменьшение размера этой зоны повышает стойкость против отслаивания (поскольку в этой зоне могут образовываться холодные трещины), улучшает качество наплавленного металла и снижает удельные нагрузки при прокатке, что повышает износостойкость валков.

При высокоскоростной наплавке в случае снижения погонной энергии уменьшаются глубина проплавления и доля участия основного металла, повышается градиент концентраций углерода и усиливается его диффузия в ЗТВ в металл шва. В результате эквивалент по углероду в ЗТВ составляет менее 0,45 и трещины не образуются.

Несмотря на то, что исследования проводили только для стали 09Г2С, полученные данные подтверждены при наплавке бандажированных опор-

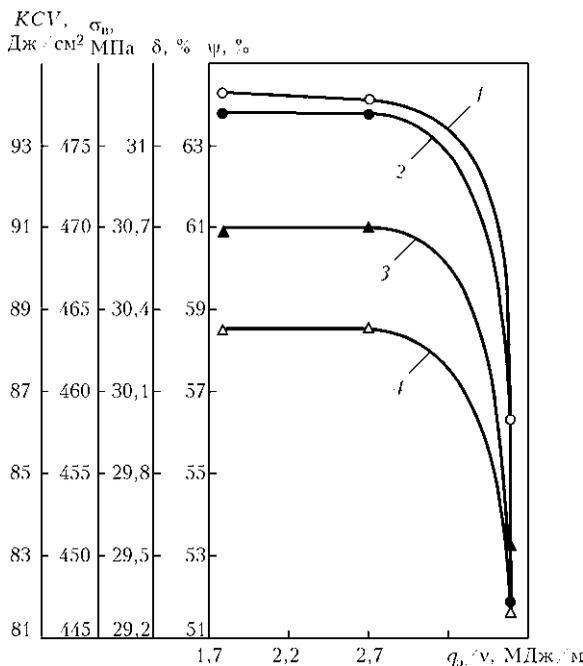


Рис. 4. Механические свойства сварных соединений при односторонней сварке составным электродом: 1 — временное сопротивление σ_B ; 2 — ударная вязкость KCV ; 3 — относительное сужение ψ ; 4 — относительное удлинение δ

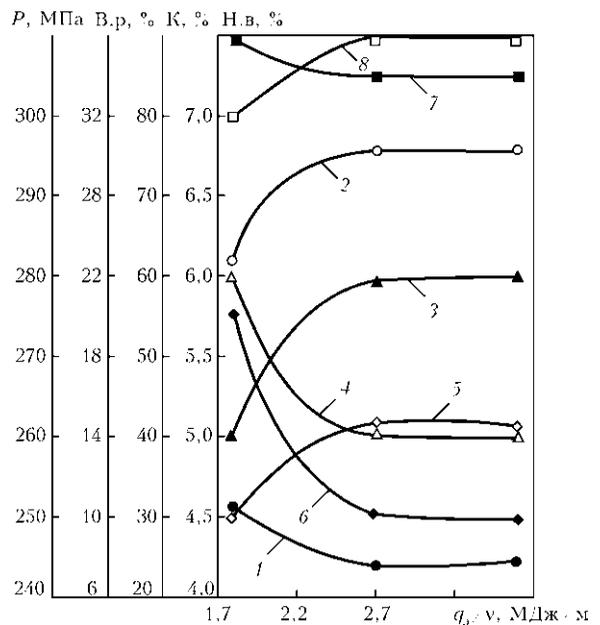


Рис. 5. Влияние формы электрода и погонной энергии на качество сварных соединений, полученных с использованием проволоки (1, 3, 5, 7) и составного электрода (2, 4, 6, 8): 1, 2 — статическая нагрузка P ; 3, 4 — неметаллические включения (Н.в.); 5, 6 — вязкое разрушение (В.р.); 7, 8 — квазискор

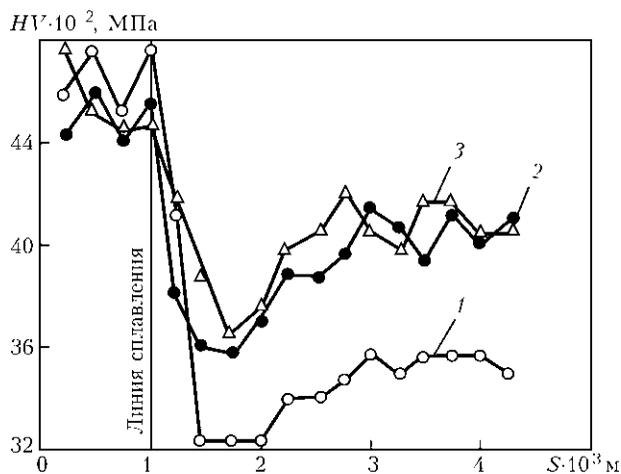


Рис. 6. Влияние погонной энергии на микротвердость HV наплавленного металла: 1 — $q_3/v = 3,6$; 2 — 2,7; 3 — 1,8 МДж/м; S — ширина ЗТВ

ных валков из стали 9ХФ, поскольку при высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии значительно снижаются сварочные напряжения, измельчается структура наплавленного металла, повышается пластичность, уменьшаются размер ЗТВ и удельное давление при прокатке металла, что исключает поломку бандажей и повышает трещиностойкость наплавленных бандажированных опорных валков.

Для повышения износостойкости бандажированных опорных валков разработан энергосберегающий способ высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии [12]. Высокоскоростную наплавку бандажированных опорных валков выполняли с предварительным и сопутствующим подогревом до 300...350 °С. Вначале наплавливали буферный слой проволокой Св-08Г2С диаметром 5 мм под флюсом АН-60, а затем — износостойкий слой. Его наплавку осуществляли проволокой Св-08Г2С диаметром 5 мм под керамическим флюсом ЖСН-5 с погонной энергии 1,3 МДж/м на следующем режиме: ток 750...800 А; напря-

жение на дуге 32...34 В; скорость наплавки 75 м/ч. После наплавки осуществляли термическую обработку и замедленное охлаждение.

Разработан энергосберегающий способ высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, обеспечивающий минимальные сварочные напряжения, формирование мелкодисперсной однородной структуры наплавленного металла и, как следствие, высокую трещиностойкость и износостойкость бандажированных опорных валков.

1. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 421 с.
2. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металле при сварке. — М.: Metallurgia, 1976. — 600 с.
3. Шоршоров М. Х., Белов В. В. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. — М.: Наука, 1972. — 228 с.
4. Влияние погонной энергии на образование отколов при наплавке высокоуглеродистой стали аустенитными проволоками / В. К. Каленский, Я. П. Черняк, В. Г. Васильев, Т. Г. Соломийчук // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 11–14.
5. Драгунов В. К., Муравьева Т. П., Родионов Ю. П. Электронно-лучевая сварка разнородных сплавов, применяемых в электромагнитных устройствах // Свароч. пр-во. — 1990. — № 4. — С. 2–4.
6. Окерблом Н. О. Сварочные деформации и напряжения. — М.; Л.: Mashgiz, 1948. — 262 с.
7. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. — М.: Высш. шк., 1982. — 272 с.
8. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
9. А. с. 1407719 СССР, МКИ В 23 К 9/00. Способ дуговой сварки / В. И. Щетинина, В. В. Чигарев, С. В. Щетинин — Оpubл. 07.07.88; Бюл. № 25.
10. Финкель В. М. Физика разрушения. — М.: Metallurgia, 1970. — 376 с.
11. Готальский Ю. Н., Снисарь В. В., Новиков Д. П. Способы сужения мартенситной прослойки в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом // Свароч. пр-во. — 1981. — № 6. — С. 7–9.
12. Пат. 65092 Україна, МКВ В 23 К 9/04. Спосіб відновлення і зміцнення циліндричних деталей / В. С. Бойко, С. В. Щетинін, В. В. Кліманчук. — Оpubл. 15.03.2004; Бюл. № 3.

Regularities of effect of high-speed electric arc hard-facing with a low energy input on welding stresses and crack resistance of deposited metal are established. Method of high-speed deposition of banded support rolls has been developed.

Поступила в редакцию 14.04.2008