

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Смоленцев М.С., Смоленцев А.С., Коробов Ю.С., Шолохов М.А. Влияние дополнительной горячей присадки при дуговой сварке порошковой проволокой высокопрочных сталей // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 87–94. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.09

Please cite this article in English as:

Smolentsev M.S., Smolentsev A.S., Korobov Yu.S., Sholokhov M.A. The effect of an additional hot additive at arc welding of high-strength steels with fluxed cored wire. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2023, vol. 25, no. 3, pp. 87-94. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.09

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 25, № 3, 2023
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.09

УДК 621.791.011

М.С. Смоленцев^{1,2}, А.С. Смоленцев¹, Ю.С. Коробов^{1,3}, М.А. Шолохов^{1,3}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Российская Федерация

²Уральский завод транспортного машиностроения, Екатеринбург, Российская Федерация

³Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Российская Федерация

**ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРИСАДКИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ
ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ**

Использование высокопрочных сталей в промышленности связано с их повышенными технико-экономическими показателями, а именно улучшением эксплуатационных характеристик с одновременным уменьшением массы изделия, более высокими прочностными и пластическими свойствами по сравнению с обычными конструкционными сталями. Однако при сварке высокопрочных сталей имеется ряд сложностей, из-за которых ограничивается их применение: наличие дефектов сварного соединения и получения прочности сварного соединения, соизмеримого с прочностью основного металла. Разработана технология импульсно-дуговой сварки в защитных газах высокопрочных сталей с дополнительной горячей присадкой. В качестве сварочной проволоки и горячей присадки использована порошковая проволока 50АХ20ТЮ, позволяющая получать в сварном соединении структуру метастабильного аустенита. По этой технологии выполнена сварка высокопрочной стали типа 45Х2НМФА толщиной 6,3 мм. Проведен анализ структуры и изменения твердости сварного соединения. Показано, что применение данной технологии позволяет получить бездефектные сварные соединения, которым присущи соизмеримые с основным металлом показатели прочности. При этом они способны к самоупрочнению под действием экстремальной механической нагрузки. Микротвердость сварного шва составляет HV_{0,1} 400...450. После интенсивного динамического воздействия, нагрузки 1500 МПа его микротвердость возрастает до HV_{0,1} 700...750. На основе предыдущих исследований авторов сделано заключение, что при использованной технологии сварки в шве образуется метастабильный аустенит. При последующем интенсивном внешнем динамическом воздействии происходит упрочнение металла шва за счет образования мартенсита деформации.

Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочные стали, метастабильный аустенит, порошковая проволока, азот, аустенит, мартенсит, мартенсит деформации, микротвердость, дополнительная присадочная проволока, твердость, холодные трещины.

M.S. Smolentsev^{1,2}, A.S. Smolentsev¹, Yu.S. Korobov^{1,3}, M.A. Sholokhov^{1,3}

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russian Federation

²URALTRANSMAH, Yekaterinburg, Russian Federation

³M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russian Federation

THE EFFECT OF AN ADDITIONAL HOT ADDITIVE AT ARC WELDING OF HIGH-STRENGTH STEELS WITH FLUXED CORED WIRE

An application of high-strength steels in industry is associated with their improved technical and economic indicators, namely: improved performance characteristics with a simultaneous reduction in the mass of the product, higher strength and plastic properties compared to conventional structural steels. However, the weldability of high-strength steels is limited due to defects in welded joints and a decrease in their strength relative to the base metal. Applying to high-strength steels a technology of a pulsed flux cored arc welding with an additional hot wire has been developed. Flux-cored wire 50ACr20TiAl was used as a welding wire and a hot filler, which makes it possible to obtain a structure of metastable austenite in a welded joint. This technology was used to weld high-strength steel of the 45Cr2NiMoVNbA type of 6.3 mm thickness. An analysis of the structure and changes in the hardness of the welded joint was carried out. It is shown that the use of this technology makes it possible to obtain defect-free welded joints, which are characterized by strength indicators comparable to the base metal. At the same time, they are capable of self-hardening under the action of an extreme mechanical load. The microhardness of the weld is HV0.1 400...450. After intense dynamic impact, load 1500 MPa, its microhardness increases to HV0.1 700...750. On the basis of previous studies of the authors, it was concluded that with the welding technology used, metastable austenite is formed in the seam. With subsequent intense external dynamic action, the weld metal is strengthened due to the formation of deformation martensite.

Keywords: arc welding, high-strength steels, metastable austenite, powder wire, nitrogen, austenite, martensite, martensite deformations, microhardness, additional filler wire, hardness, cold cracks.

Введение

На сегодняшний день высокопрочные стали находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Сочетание высокой прочности с достаточной пластичностью, вязкостью, хладостойкостью и удовлетворительной свариваемостью открывают широкие возможности использования их для изготовления сварных конструкций [1].

Высокопрочные среднелегированные стали, предназначенные для изготовления различных деталей, в том числе и крупногабаритных, должны содержать минимальное необходимое содержание легирующих элементов, таких как Cr, Mn, Si, Ni, W, не менее 2–3 %; высококачественные высокопрочные стали – некоторое количество никеля и, желательно, один или несколько интенсивных карбидообразующих элементов (Mo, W, Nb, V) [2]. Легирующие элементы и, особенно, карбидообразующие легирующие элементы задерживают процессы разупрочнения при отпуске [3].

Для производства корпусов конструкций специальной техники находят применение высокопрочные и ультравысокопрочные стали мартенситного и мартенситно-бейнитного класса. Как правило, это среднелегированные термоупрочненные стали с временным сопротивлением разрыву $\sigma_B = 1500\text{--}2350$ МПа [4]. Высокие механические свойства среднелегированных сталей достигаются легирующими элементами, упрочняющими феррит и повышающими прокаливаемость стали, и необходимой термообработкой, после которой полностью проявляется положительное влияние леги-

рующих элементов. Поэтому среднелегированные стали всегда характеризуются как химическим составом, так и видом термообработки [5].

Свойства высокопрочных сталей после закалки и низкого отпуска обусловлены главным образом содержанием углерода. Чтобы получить стали с необходимой вязкостью и пластичностью, нужно их какое-то «минимальное» легирование; типичные же механические свойства могут быть получены и при самых различных сочетаниях легирующих элементов [2]. А. П. Грабин считает, что роль легирования сводится к обеспечению нужной прокаливаемости стали. Когда будет достигнута необходимая прокаливаемость стали, лишнее легирование будет ухудшать механические свойства.

Следует отметить, что эффективность воздействия определенного легирующего элемента зависит не только от его количества, но и от наличия других элементов, а также от температуры нагрева, величины зерна и других факторов. Например, известно, что небольшие добавки молибдена в среднеуглеродистой стали действуют значительно слабее, чем в хромоникельмолибденовой стали с таким же содержанием углерода [6].

Легирование стали хромом, никелем, марганцем усиливает отпускную хрупкость. Особенно сильно охрупчивается сталь при совместном легировании Cr + Ni, Cr + Mn, Cr + Mn + Si и др. Введение Mo $\leq 0,4\text{--}0,5$ % и W $\leq 1,2\text{--}1,5$ % уменьшает, а иногда полностью подавляет склонность стали к обратимой отпускной хрупкости; при более высоком содержании этих элементов хрупкость вновь увеличивается [7].

Основными сложностями при сварке данных сталей является высокая склонность металла шва (МШ) и зоны термического влияния (ЗТВ) к холодным трещинам (ХТ), повышенная склонность к горячим трещинам (ГТ) из-за многокомпонентного легирования, возможность образования «подваликовых» кристаллизационных трещин при многослойной сварке аустенитным электродным металлом и трещин в виде «отколов» в околошовной зоне (ОШЗ) при сварке, а также получение механических свойств сварных швов и ЗТВ на уровне основного металла [1; 8].

Холодные трещины образуются в сварных соединениях при остывании их до относительно невысоких температур, как правило, ниже 200 °С. К этому времени металл шва и околошовной зоны приобретает высокие упругие свойства, присущие ему при нормальных температурах. Холодные трещины являются типичным дефектом сварных соединений из среднелегированных и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов. Холодные трещины наиболее часто поражают околошовную зону и реже металл шва [6].

Образование холодных сварочных трещин является одной из основных проблем свариваемости, связанной с технологией изготовления сварных конструкций из сталей с повышенной и высокой прочностью. Данные дефекты непосредственно отражаются на их работоспособности и надежности [9].

Также при сварке высокопрочных среднелегированных сталей существует вероятность возникновения горячих трещин.

Горячие трещины – хрупкие межкристаллические разрушения металла шва и околошовной зоны, возникающие в твердожидком состоянии в процессе кристаллизации, а также при высоких температурах в твердом состоянии [10].

Для решения перечисленных проблем перспективным направлением сварки высокопрочных сталей является дуговая сварка в защитных газах с подачей в хвостовую часть сварочной ванны дополнительной горячей присадки (ДГП) [11–21], подогретой до 700–800 °С путем внедугового электроконтактного нагрева. Расплавление ДГП тепловой сварочной ванны без дугообразования и каплеобразования позволяет повысить коэффициенты перехода легирующих элементов в металл шва (МШ). Сварка с ДГП снижает долю участия основного металла (ОМ) в МШ и уменьшает тепловложение в ОМ. Кроме этого, снижается протяженность ЗТВ, уменьшается число проходов при многослойной сварке за счет увеличения высоты наплавки [18]. Это повышает стойкость к трещи-

нообразованию сварных соединений из высокопрочных сталей, склонных к закалке.

Метод сварки с дополнительной подогретой присадочной проволокой был впервые разработан в МГТУ им. Н.Э. Баумана [20]. Показано, что метод сварки с ДГП может решить ряд целевых задач: увеличение скорости расплавления сварочных материалов, позволяющее снизить погонную энергию, и ввести в металл шва микролегирующие и модифицирующие элементы, содержащиеся в ДГП [19, 21].

Однако в работах [19; 21] представлен нагрев ДГП с помощью проходящего тока с замыканием на сварочную ванну, что впоследствии может привести к дугообразованию и невозможности регулирования температуры нагрева ДГП. Также при замыкании ДГП на сварочную ванну изменяется сварочный ток на дуге, за счет отбора части энергии на нагрев ДГП.

Известно, что в высокотемпературной части цикла ДГП является охладителем металла и увеличивает скорость охлаждения в шве, снижает скорость охлаждения в околошовной зоне при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении, что свидетельствует о снижении доли тепла, идущего на нагрев основного металла. Изменения тепломассопереноса при сварке с ДГП приводят к изменению баланса тепловой энергии и к возможности его оптимизации. Также при сварке с ДГП наблюдается более высокая сопротивляемость металла шва к образованию горячих трещин, и повышению стойкости к образованию холодных трещин. Это связано, в первую очередь, со снижением уровня водорода, которое объясняется тем, что в исходном составе в ДГП практически нет водорода, а при сварке она не проходит через столб дуги и стадию капельного переноса, где преимущественно МШ насыщается водородом и другими газами [21].

К преимуществам сварки с ДГП следует отнести и возможность ввода в шов проволок любой системы легирования, что способствует рафинированию и подавляет порообразование от выделения CO_2 и других газов при выгорании углерода и распада модификаторов. Одно из технологических преимуществ ввода ДГП в охлаждающую часть сварочной ванны состоит в том, что практически не происходит снижения стабильности и глубины проплавления свариваемых кромок в головной части сварочной ванны и обеспечивается стабильное формирование шва в хвостовой части ванны. Кроме этого, при вводе ДГП имеет место повышение качества сварных соединений за счет локального стока тепла из кристаллизующейся части ванны, что оптимизирует термический цикл, структу-

ру соединений, а также обеспечивает особо эффективный процесс микролегирования и модифицирования ванны [21].

В качестве дополнительной присадки могут использоваться порошковые проволоки, которые расширяют возможности микролегирования и модифицирования МШ [21–24]. Ввод присадки в более холодную часть сварочной ванны концентрирует металл присадки в зоне стыка кристаллов, называемой зоной «слабины», что также повышает сопротивляемость горячим трещинам [16; 21].

Перспективно обеспечить наличие в сварном шве структуры метастабильного аустенита (МСА) за счет сварочной и присадочной проволок. Стали с такой структурой представляют интеллектуальные материалы. За счет регулируемого мартенситного превращения они обеспечивают хорошую свариваемость вследствие пластичности аустенита, а воздействие значительных внешних нагрузок сопровождается следующими синергетическими эффектами [25; 26]:

- релаксация микронапряжений в поверхностных слоях, поскольку энергия внешней нагрузки, которая воздействует на поверхность, рассеивается вследствие микро-ТРИП-эффекта деформационного превращения метастабильного аустенита в мартенсит;
- рост твердости из-за увеличения доли мартенситной фазы в структуре;
- снижение напряжений в сварном шве из-за структурных превращений.

Вследствие указанных эффектов при высокочастотных нагрузках у металла со структурой метастабильного аустенита наблюдается значительное повышение свойств за счет реализации внутреннего ресурса самого материала. Образующийся мартенсит, обладая большой прочностью и твердостью, противостоит ударному разрушению и обеспечивает повышение ударной стойкости металла шва до уровня основного металла. При этом длительность мартенситного превращения крайне мала, порядка 10^{-7} с [3; 27]. Это быстрее примерно на порядок, чем время самых динамичных внешних механических воздействий.

Целью данного исследования является изучение свойств сварных соединений, имеющих в структуре метастабильный аустенит (МСА), выполненных дуговой сваркой с ДГП порошковой проволокой, а также определение механизма упрочнения металла шва (МШ) после интенсивного динамического воздействия (ИДВ).

Материалы и методы

В качестве сварочного материала использована порошковая проволока ПП-ГСН ТУ 24.34.13-

002-02069208-2017 Ø1,2 мм, химический состав, мас. %: (0,30–0,40) С, (0,10–0,20) N, (18,50–22,0) Cr, (0,08–0,20) Ti, (0,005–0,05) Al. Проволока этого типа позволяет получить в структуре сварного шва метастабильный аустенит, который имеет высокие пластические характеристики, что позволит снизить склонности к образованию трещин за счет релаксации напряжений, а также способен к самоупрочнению под действием интенсивной механической нагрузки [25].

Сварку образцов производили на установке S5 SpeedPulse (ООО «Шторм-Лорх», Екатеринбург) за 2 прохода с послойной зачисткой; корневой шов выполняли без ДГП. Режимы сварки представлены в таблице.

Параметры режимы сварки

Тип шва	$I_{св}$, А	$U_{д}$, А	$V_{св}$, м/ч	$V_{под}$, м/мин	$V_{под}$ дгп, м/мин	Расход газа, л/мин
Корневой	200	24,7	21	6,3	-	12–14
Заполняющий	180	34,5	16	10	2,8	12–14

Для проведения исследований производили дуговую сварку с ДГП пластин с разделкой кромок С17 ГОСТ 14771-76 размером 220×60×6,3 мм из высокопрочной среднелегированной стали 45Х2НМФА, термообработанной на твердость HRC 50–55. Схема подачи ДГП приведена на рис. 1.

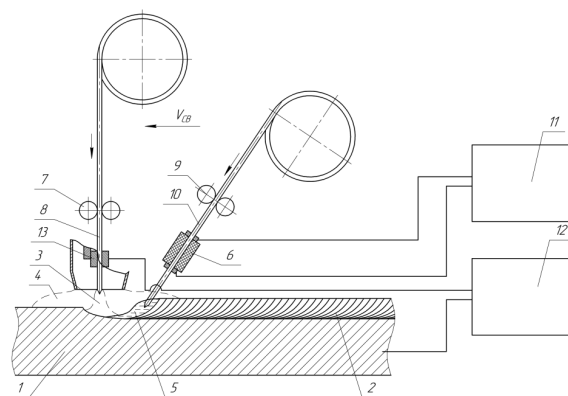


Рис. 1. Схема установки: 1 – ОМ, 2 – МШ, 3 – дуга, 4 – защитный газ, 5 – сварочная ванна, 6 – подогревающий элемент, 7 – механизм подачи проволоки, 8 – проволока, 9 – механизм подачи ДГП, 10 – ДГП, 11 – источник питания для ДГП, 12 – основной источник питания, 13 – контактный наконечник [17]

В отличие от работ [19; 21], нагрев ДГП производится в подогревающем элементе, что позволяет избежать дугообразования при сварке, а также электрического воздействия на процесс горения дуги. Также подогреваемый элемент позволяет точнее контролировать температуру присадочной

проволоки за счет более точного контролирования проходящего по проволоке тока.

Твердость ОМ измеряли на твердомере ЗИП ТК-2М с нагрузкой 150 кгс. Микротвердость сварного соединения измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,1 кгс ($HV_{0,1}$) согласно ГОСТ 57180. Оценку степени упрочнения МШ при ИДВ осуществляли по методике «двух твердомеров» включающей нагружение шариком $\varnothing 5$ мм на прессе Бринелля при нагрузке 1500 кг с последующим измерением твердости в лунке на приборе Роквелла при нагрузке 1500 кг [28] (рис. 2). Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Olympus GX53 (Япония).

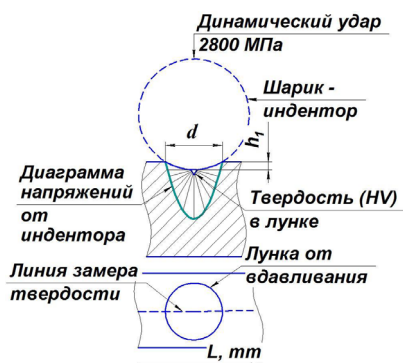


Рис. 2. Методика оценки микротвердости после динамического нагружения

Результаты и их обсуждение

Внешний вид сварных соединений, выполненных импульсно-дуговой сваркой с ДГП, представлен на рис. 3. При визуальном контроле образцов недопустимые дефекты не обнаружены. Валики равномерные, без наплывов, нет подрезов. Поверхность ровная, заметна неярко выраженная чешуйчатость, пор или зашлаковок на поверхности не обнаружено, нет вплавленных крупных капель.

Структура МШ включает метастабильный аустенит с равноосными зёрнами (30 ± 10 мкм) и мелкодисперсные карбиды, расположенные по границам зерен. На расстоянии до 0,5–1 мм от линии сплавления зёрна аустенита приобретают более вытянутую форму, ориентированную длинной осью перпендикулярно границе шва (рис. 4, а).

Структура основного металла (ОМ) на линии сплавления – крупнопластинчатый сорбит отпуска, а в остальной части зоны термического влияния (ЗТВ) структура состоит из мелкодисперсного сорбита отпуска или мелкодисперсного перлита. Зона сплавления имеет зубчатое строение с заходом участков аустенита в ОМ (рис. 4, б). Микротвердость МШ варьируется в интервале $HV_{0,1}$ 400...450. Микротвердость ЗТВ, протяженность которой составляет 4,0...4,5 мм, изменяется в диапазоне $HV_{0,1}$ 400...500 (рис. 5).



Рис. 3. Внешний вид сварных швов

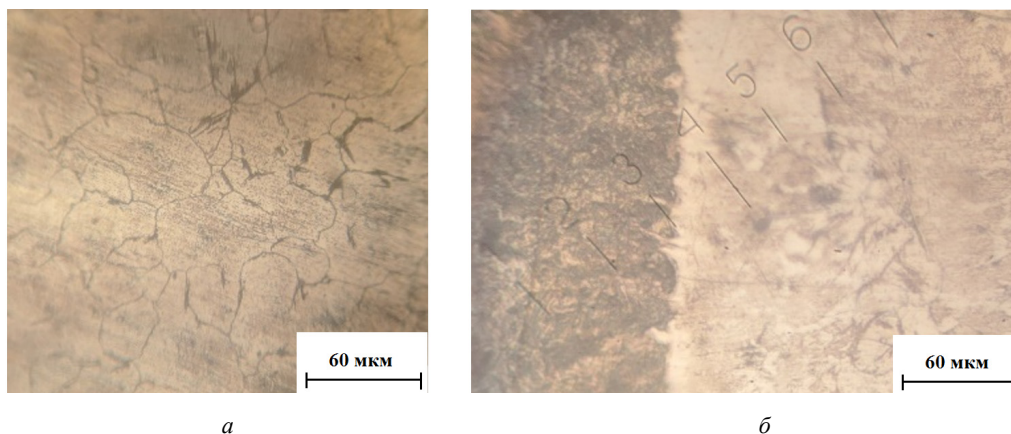


Рис. 4. Структуры сварного шва (а) и линии сплавления (б)

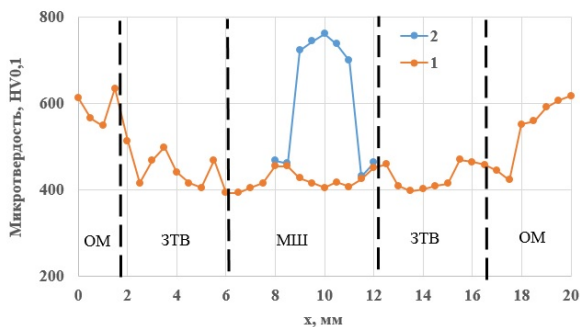


Рис. 5. Распределение микротвердости: 1 – до ИДН в сварном соединении, 2 – после ИДН в МШ

Твердость МШ после динамического нагружения по методике «двух твердомеров» увеличилась с 37...38 до 56...57 HRC (соответствует 700...750 HV_{0,1}). Такой значительный рост твердости не может быть вызван только наклепом металла и свидетельствует о метастабильности аустенита и деформационном мартенситном превращении [25].

Для оценки производительности способа сварки с ДГП были сварены образцы из стали толщиной 6,6 мм в один проход с зазором 4 мм. Образцы сварены импульсно-дуговой сваркой без применения ДГП и с ДГП (рис. 6). Сварка производилась на одинаковых режимах. Далее были измерены геометрические характеристики швов. После сварки получены следующие данные при сварке с ДГП: $e = 18$ мм, $g = 2$ мм, $e_1 = 6,5$ мм, $g_1 = 1$ мм; без ДГП: $e = 18$ мм, $g = 2$ мм, $e_1 = 5,8$ мм, $g_1 = 1$ мм.

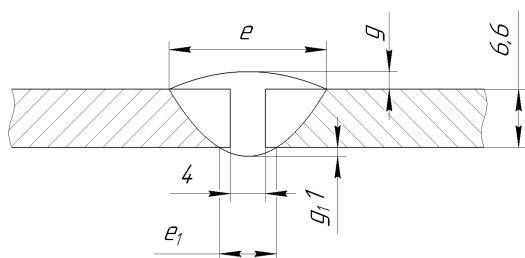


Рис. 6. Геометрические характеристики сварных швов с ДГП и без ДГП

Проведя расчеты площади наплавленного металла (55 мм^2 с ДГП и 43 мм^2 , без ДГП), можно сделать вывод, что производительность сварки с ДГП выше на 28 %.

Также был определен коэффициент наплавки для каждого способа сварки, производилась наплавка двумя способами сварки на одинаковых режимах на пластины $200 \times 200 \times 6,6$ мм, после наплавки по измеренной потере массы (с ДГП 86,35 г, без ДГП 67,51 г) и рассчитанному коэффициенту наплавки (с ДГП $\alpha_n = 28,8 \text{ г}/(\text{А} \cdot \text{ч})$, без ДГП $\alpha_n =$

$= 22,5 \text{ г}/(\text{А} \cdot \text{ч})$) определено, что производительность сварки с ДГП выше на 27,8 %, что сходится со значением, приведенным выше.

Заключение

При интенсивном динамическом воздействии твердость металла шва в сварном соединении, из высокопрочной среднелегированной стали при сварке с дополнительной горячей присадкой проволокой ПП-ГСН, увеличивается с 37...38 до 56...57 HRC. Такой резкий рост не может быть вызван деформационным упрочнением (наклепом) и свидетельствует о деформационном мартенситном превращении.

При использовании сварки с ДГП имеется значительное увеличение производительности процесса сварки примерно на 28 %.

Библиографический список

1. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 474 с.
2. Потак Я.М. Высокопрочные стали. Серия: Успехи современного металловедения. – М.: Металлургия, 1972. – 208 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
4. Гладышев С.А., Григорян В.А. Броневые стали. – М.: Интермет Инжиниринг, 2010. – 334 с.
5. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. / редкол.: Г.А. Николаев (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 2 / под ред. А.И. Акулова. 1978. – 462 с.
6. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 248 с.
7. Машиностроение: энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Стали. Чугуны. Т. II-2 / Г.Г. Мухин, А.И. Беляков, Н.Н. Александров и др.; под общ. ред. О.А. Банных и Н.Н. Александрова, 2001. – 784 с.
8. Походня И.К. Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Автоматическая сварка. – 2003. – № 3. – С. 9–20.
9. Гончаров С.Н., Шалимов М.П. Холодные трещины при сварке высокопрочных среднелегированных сталей. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 96 с.
10. Сварка металлов и сплавов: учеб. пособие / Б.В. Арнаутов [и др.]. Екатеринбург: ГОУ УГТУ–УПИ, 2008. – 489 с.
11. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 702 с.
12. A Study on Process Characteristics and Performance of Hot Wire Gas Tungsten Arc Welding Process for High Temperature Materials / A. Padmanaban, B. Neelakandan, D. Kandasamy // Materials Research. – 2017. – № 20(1). – P. 76–87.
13. О системном подходе к решению проблемы свариваемости хладостойких мостовых сталей / Б.Ф. Якушин, В.С. Килев, В.П. Тихонов [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 7–8. – С. 32–39.

14. Tsuyama T., Yuda M., Nakai K. Effects of hot wire on mechanical properties of weld metal using gas-shielded arc welding with CO₂ gas // *Weld World*. – 2014. – № 58. – P. 77–83.

15. Metal Transfer Mechanisms in Hot-Wire Gas Metal Arc Welding / P.P.G. Ribeiro, R.A. Ribeiro, P.D.C. Assuncao, E.M. Braga, A.P. Gerlich // *Welding Journal*. – 2020. – Nov. – P. 281–294.

16. Якушин Б.Ф. Разработка научных основ и способов обеспечения технологической прочности сварных соединений крупногабаритных конструкций из сталей и сплавов ограниченной свариваемости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.06; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – М., 2000. – 31 с.

17. Смоленцев М.С., Коробов Ю.С. Повышение производительности и качества сварных соединений из высокопрочных сталей, выполненных импульсно-дуговой сваркой с дополнительной горячей присадкой // *Актуальные проблемы развития технических наук: сб. статей XXIV обл. конкурса НИОКР «Научный Олимп»*. – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – С. 123–129.

18. Hot Wire-Assisted Gas Metal Arc Welding of Ni-Based Hardfacing / K.Gurtner, J.P. Bergmann, C. Zhang, M. Rozenberger, G. Notni // *Welding Journal*. – 2018. – April. – P. 99–107.

19. Tsuyama T., Nakai K., Tsuji T. Development of submerged arc welding method using hot wire // *Weld World*. – 2014. – № 58. – P. 713–718.

20. А.с. СССР № 525511 Якушин Б.Ф., Алешин О.П., Фирсова Р.И. Способ сварки закаляющихся сталей. – Бюл. 1976, № 31.

21. Совершенствование процесса сварки хладостойких сталей путем оптимизации баланса тепловой энергии дугового источника / Н.П. Алешин [и др.] // *Сварочное производство*. – 2018. – № 10. – С. 3–13.

22. Коберник Н.В. Современные представления о модифицировании наплавленного металла и металла шва наноразмерными частицами (ОБЗОР) // *Сварка и диагностика*. – 2015. – № 5. – С. 17–22.

23. Линник А.А. Разработка технологических приемов модифицирования металла шва наноразмерными частицами с применением порошковых проволок при сварке под флюсом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10. – М., 2017. – 124 с.

24. The effect of electrochemical composite coatings with LaF₃-LaB₆ particles in nickel-copper matrix on the metallurgical processes in arc welding of low alloy ferrite-pearlite steels / S. Parshin, V. Karkhin, P. Maур, A. Maуstro // *Materials*. – 2021. – № 14. – P. 1509.

25. Особенности структуры сварного соединения среднеуглеродистой хромистой стали, содержащей метастабильный аустенит / Ю.С. Коробов, О.В. Пименова, М.А. Филиппов, Н.Н. Хадыев, Н.Н. Озерец, С.Б. Михайлов, С.О. Морозов, Ю.С. Давыдов, Н.М. Разиков // *Материаловедение*. – 2019. – № 6. – С. 3–10.

26. Повышение абразивной износостойкости низколегированных сталей за счет получения в их структуре наряду с другими составляющими остаточного метастабильного аустенита и реализация эффекта самозакалки при нагружении / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов, Д.В. Бурова, В.В. Аниченков // *Материаловедение*. – 2015. – № 2. – С. 27–30.

27. Эстрин Э.И., Лободюк В.А. Мартенситные превращения. – М.: Литрес, 2016. – 350 с.

28. Инженерный метод оценки способности металлов и сплавов к деформационному упрочнению / М.А. Филиппов, Е.И. Корзунова, В.А. Шарапова, В.В. Легчило // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2019. – Т. 15, № 3(171). – С. 126–129.

References

1. Makarov E.L., Iakushin B.F. Teoriia svarivaemosti stalei i splavov [Theory of weldability of steels and alloys]. Moscow: Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Baumana, 2014, 474 p.

2. Potak Ia.M. Vysokoprochnye stali. Seriiia «Uspekhi sovremennogo metallovedeniia» [High-strength steels. Series "Advances in Modern Metallurgy"]. Moscow: Metallurgiiia, 1972, 208 p.

3. Guliaev A.P. Metallovedenie. Uchebnik dlia vuzov [Metallurgy. Textbook for universities]. 6nd. Moscow: Metallurgiiia, 1986, 544 p.

4. Gladyshev S.A., Grigorian V.A. Bronevye stali [Armor steels]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2010, 334 p.

5. Svarka v mashinostroenii: Spravochnik. V 4 tomah [Welding in mechanical engineering: Handbook. In 4 vol.] Ed. G.A. Nikolaev (pred.) et al. Moscow: Mashinostroenie, 1978, vol. 2. Ed. A.I. Akulova, 1978, 462 p.

6. Makarov E.L. Kholodnye treshchiny pri svarke legirovannykh stalei [Cold cracks in welding of alloy steels]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 248 p.

7. Mashinostroenie. Entsiklopediia [Mechanical Engineering. Encyclopedia]. Ed. K.V. Frolov (pred.) et al. Moscow: Mashinostroenie. Stali. Chuguny. Vol. II–2. Ed. Bannykh O.A., Aleksandrova N.N., 2001, 784 p.

8. Pokhodnia I.K. Svarochnye materialy: sostoiianie i tendentsii razvitiia [Welding materials: status and development trends]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2003, no. 3, no. 9–20.

9. Goncharov S.N., Shalimov M.P. Kholodnye treshchiny pri svarke vysokoprochnykh srednelegirovannykh stalei [Cold cracks in welding of high-strength medium-alloy steels]. Ekaterinburg: UrFU, 2012, 96 p.

10. Arnavtov B.V. et al. Svarka metallov i splavov: uchebnoe posobie [Welding of metals and alloys: textbook]. Ekaterinburg: GOU UGTU–UPI, 2008, 489 p.

11. Teoriia svarochnykh protsessov: uchebnik dlia vuzov [Theory of welding processes: textbook for universities]. Ed. V.M. Nerovnogo. Moscow: Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Baumana, 2016, 702 p.

12. Padmanaban A., Neelakandan B., Kandasamy D. A Study on Process Characteristics and Performance of Hot Wire Gas Tungsten Arc Welding Process for High Temperature Materials. *Materials Research*, 2017, no. 20(1), pp. 76–87.

13. Iakushin B.F., Kilev V.S., Tikhonov V.P. et al. O sistemnom podkhode k resheniiu problemy svarivaemosti khladoistoikikh mostovykh stalei [On system approach to solving the problem of weldability of cold-resistant bridge steels]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2018, no. 7–8, pp. 32–39.

14. Tsuyama T., Yuda M., Nakai K. Effects of hot wire on mechanical properties of weld metal using gas-shielded arc welding with CO₂ gas. *Weld World*, 2014, no. 58, pp. 77–83.

15. Ribeiro P.P.G., Ribeiro R.A., Assuncao P.D.C., Braga E.M., Gerlich A.P. Metal Transfer Mechanisms in Hot-Wire Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 2020, pp. 281–294.

16. Iakushin B.F. Razrabotka nauchnykh osnov i sposobov obespecheniia tekhnologicheskoi prochnosti svarykh soedinenii krupnogabaritnykh konstruksii iz stali i splavov ograni-chennoi svarivaemosti: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.03.06; Mosk. gos. tekhn. un-t im. N.E. Baumana. M., 2000. 31 s.

17. Smolentsev M.S., Korobov Iu.S. Povyshenie proiz- voditel'nosti i kachestva svarykh soedinenii iz vysoko- prochnykh stali, vypolnennykh impul'sno-dugovoi svarkoi s dopolnitel'noi goriachei prisadkoi [Increase of productivity and quality of welded joints from high-strength steels made by pulse-arc welding with additional hot additive]. *Aktual'nye problemy razvitiia tekhnicheskikh nauk: sb. statei XXIV obl. konkursa NIOKR «Nauchnyi Olimp»*. Ekaterin- burg: UrFU, 2021, pp. 123–129.

18. Hot Wire-Assisted Gas Metal Arc Welding of Ni- Based Hardfacing / K.Gurtner, J.P. Bergmann, C. Zhang, M. Rozenberger, G. Notni // *Welding Journal*. 2018. April. P. 99–107.

19. Tsuyama T., Nakai K., Tsuji T. Development of submerged arc welding method using hot wire. *Weld World*, 2014, no. 58, pp. 713–718.

20. A.S. SSSR № 525511 Iakushin B.F., Aleshin O.P., Firsova R.I. Sposob svarki zakalivaiushchikhsia stali [Welding method for hardening steels]. *Biul.* 1976, no. 31.

21. Aleshin N.P. et al. Sovershenstvovanie protsessa svarki khladostoikikh stali putem optimizatsii balansa teplovoi energii dugovogo istochnika [Improvement of welding process of cold-resistant steels by optimization of arc source heat energy balance]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2018, no. 10, pp. 3–13.

22. Kobernik N.V. Sovremennye predstavleniia o modi- fytsirovanii naplavlennogo metalla i metalla shva nanoraz- mernymi chastitsami (OBZOR) [Modern concepts of modifica- tion of weld metal and weld metal by nanoscale particles (OVERVIEW)]. *Svarka i Diagnostika*, 2015, no. 5, pp. 17–22.

23. Linnik A.A. Razrabotka tekhnologicheskikh pri- emov modifitsirovaniia metalla shva nanorazmernymi chastitsami s primeneniem poroshkovykh provolok pri svarke pod flusom [Development of technological methods of seam metal modification with nanosized particles using flux-cored wires for submerged-arc welding]. PhD. Thesis. Moscow, 2017, 124 p.

24. Parshin S., Karkhin V., Mayr P., Maistro A. The effect of electrochemical composite coatings with LaF3-LaB6 particles in nickel-copper matrix on the metallurgical processes in arc welding of low alloy ferrite-pearlite steels. *Materials*, 2021, no. 14, pp. 1509.

25. Korobov Iu.S., Pimenova O.V., Filippov M.A., Khadyev N.N., Ozerets N.N., Mikhailov S.B., Morozov S.O., Davydov Iu.S., Razikov N.M. Osobennosti struktury svarnogo soedineniia sredneuglerodistoi khromistoi stali, sodержashchei me-tastabil'nyi austenit [Peculiarities of structure of welded joint of medium carbon chromium steel containing metastable austenite]. *Materialovedenie*, 2019, no. 6, pp. 3–10.

26. Malinov L.S., Malinov V.L., Burova D.V., Ani- chenko V.V. Povyshenie abrazivnoi iznosostoikosti niz- kolegirovannykh stali za schet polucheniia v ikh struktu- re nariadu s drugimi sostavliaiushchimi ostatochnogo meta- stabil'nogo austenita i realizatsiia effekta samoza-kalki pri nagruzhonii [Increase of abrasive wear resistance of low- alloyed steels due to obtaining in their structure along with other components of residual meta-stable austenite and reali- zation of the effect of self-calculation at loading]. *Materialovedenie*, 2015, no. 2, pp. 27–30.

27. Estrin E.I., Lobodiuk V.A. Martensitnye prevra- shcheniia [Martensitic transformations]. Moscow: Litres, 2016, 350 p.

28. Filippov M.A., Korzunova E.I., Sharapova V.A., Legchilo V.V. Inzhenernyi metod otsenki sposobnosti me- tallov i splavov k deformatsionnomu uprochneniiu. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia*, 2019, vol. 15, no. 3(171), pp. 126–129.

Поступила: 17.05.2023

Одобрена: 23.06.2023

Принята к публикации: 01.09.2023

Об авторах

Смоленцев Михаил Сергеевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Техноло- гия сварочного производства» (ТСП) УрФУ, инженер АО «Уралтрансмаш» (г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: smolentseff.misha@yandex.ru).

Смоленцев Алексей Сергеевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – ассистент, ТСП УрФУ (г. Ека- теринбург, ул. Мира, 19, e-mail: A.S.Smolentsev@mail.ru).

Коробов Юрий Станиславович (Екатеринбург, Российская Федерация) – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной и плазменной обработки ИФМ УрО РАН, про- фессор ТСП УрФУ (г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 91, e-mail: yukorobov@gmail.com).

Шолохов Михаил Александрович (Екатеринбург, Российская Федерация) – доктор технических наук, заве- дующий кафедрой «Автоматизация и роботизация свароч- ного производства», профессор ТСП УрФУ, ведущий науч- ный сотрудник ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург, ул. Пер- вомайская, 91, e-mail: m.a.sholokhov@urfu.ru).

About the authors

Mikhail S. Smolentsev (Yekaterinburg, Russian Federation) – Postgraduate student of the Department of Welding Production Technology (WPT), UrFU, engineer of Uraltransmash JSC, (19, Mira str., Yekaterinburg, e-mail: smolentseff.misha@yandex.ru).

Alexey S. Smolentsev (Yekaterinburg, Russian Feder- ation) – Assistant, WPT UrFU (19, Mira str., Yekaterinburg, e-mail: A.S.Smolentsev@mail.ru).

Yuri S. Korobov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Laser and Plasma Processing of IMP UB RAS, Professor of WPT, UrFU (19, Mira str., Yekaterinburg, e-mail: yukorobov@gmail.com).

Mikhail A. Sholokhov (Yekaterinburg, Russian Feder- ation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Automation and Robotization of Welding Production", Professor of WPT, UrFU, Leading Researcher of IMP UB RAS (91 Str., Pervomaiskaya, Yekaterinburg, e-mail: m.a.sholokhov@urfu.ru).

Финансирование. Работа выполнена в рамках го- сударственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура» № 122021000033-2).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсут- ствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.