



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.791.011

С.А. ИСАКОВ, магистр техн. наук

аспирант, старший преподаватель кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей¹

E-mail: isakov_sa@grsu.by

С.Д. ЛЕЩИК, канд. техн. наук, доц.

заведующий кафедрой машиноведения и технической эксплуатации автомобилей¹

E-mail: s.lesh@grsu.by

¹Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 05.11.2018.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУИ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ГАЗА НА ЗОНУ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ

Во введении указан объект исследования — полуавтоматическая электродуговая сварка плавящимся электродом деталей из низкоуглеродистых сталей в среде защитного газа (GSMAW). Предмет исследования — регистрация наблюдаемых изменений стыковых сварных соединений при различных режимах сварки деталей, а также контроль процесса изменения температуры сварки и охлаждения после сварки стальных деталей. Актуальность темы заключается в исследовании и реализации на практике активных методов контроля и управления процессом сварки деталей из низкоуглеродистых сталей для получения соединений с редуцированием последствий термического влияния. Научная новизна состоит в разработке метода, позволяющего использовать защитные газы для управления охлаждением зоны термического влияния сварного шва (а именно участков перегрева и перекристаллизации), отличающийся от известных методов, описанных в патентах РФ и США, тем, что охлаждающий инертный газ воздействует в период достижения в зоне термического влияния максимальных температур непосредственно после образования шва и направлен со стороны сварки против движения сварочной горелки, с целью влияния на процесс структурного преобразования основного металла, возникновения механических деформаций и видимой зоны термического влияния. В основной части статьи представлены результаты газодинамического воздействия охлаждающего газа на процесс охлаждения стальных деталей. Описана установка, спроектированная для обеспечения газодинамического охлаждения свариваемых деталей. Представлен графический материал, полученный при инфракрасной съемке процесса сварки. С помощью инфракрасной съемки определены области видимой и действительной границы зоны термического влияния. Определена локализация газодинамического охлаждения. Процесс охлаждения производился при использовании проходных отверстий различного диаметра. Обработка результатов показала значительное уменьшение видимой зоны термического влияния на свариваемых деталях. Также отмечается уменьшение механических деформаций сварных деталей как результат охлаждения зоны термического влияния. Следствием этого является уменьшение модуля внутренних напряжений сварных конструкций, а также минимизация смещения точек конструкций, что улучшает их базирование при сборке. В заключении рассматривается, что использование защитного газа вне зоны сварки, а в зоне термического влияния для охлаждения основного металла и управления процессом фазовых превращений позволяет сократить видимую зону термического влияния свариваемых деталей и их видимые деформации.

Ключевые слова: электродуговая сварка, защитный газ, термодформационный цикл, зона термического влияния, участок перекристаллизации, механические деформации, газодинамическое охлаждение

Введение. Способ и интенсивность охлаждения участка перегрева и перекристаллизации зоны термического влияния при сварке деталей из низкоуглеродистой стали оказывают воздействие на процессы формирования фаз и зерен основного металла, тем самым позволяя снижать температурное влияние на появление внутренних напряжений и деформаций в металле. Газовое охлаждение зоны термического влияния — универсальный способ терморегулирования процесса формирования сварных соединений, т. к. является доступным, обеспечивает достаточную защиту основного металла от воздействия воздуха и при правильном подборе газа и параметров его воздействия обеспечивает необходимую интенсивность охлаждения.

Поскольку сварочные процессы протекают при быстром изменении температуры, существует необходимое условие управления и контроля охлаждения основного металла в зоне перегрева. Интенсификация потока охлаждающего газа до высокоскоростной турбулентной характеристики достигается за счет использования сопла с наибольшим проходным сечением.

Проблематика исследования. Надежность и качество сварных соединений зависят от множества факторов. В процессе остывания стальные детали подвергаются последствиям температурного влияния точки расплава — механическим деформациям, соответствующим текущим структурным изменениям металла. Это влечет за собой формирование неоднородной структуры стали и возникновение остаточных напряжений [1]. Подавляющий эффект на изменение физико-механических характеристик сварных соединений стальных деталей оказывает структура зоны термического влияния свариваемых деталей [2]. Современные разрабатываемые и исследуемые методы управления процессом сварки стальных деталей являются наукоемкими и требуют вмешательства высококвалифицированных специалистов и дорогостоящего оборудования.

Под зоной термического влияния принято понимать примыкающую к сварному шву зону основного металла с измененной в процессе сварки структурой. Главная особенность строения зоны термического влияния перлитных и мартенситных сталей обусловлена тем, что эти материалы являются сплавами на основе металлов, претерпевающих полиморфное превращение. Поэтому при любом исходном состоянии основного металла в зоне термического влияния этих сплавов всегда можно наблюдать участки полной и частичной перекристаллизации.

Особый интерес к изучению процессов в околошовной зоне при сварке обусловлен тем, что именно в ней, как правило, происходят наиболее резкие изменения структуры и свойств основного металла, которые в большинстве случаев ока-

зываются решающими при оценке свариваемости (снижение пластичности и ударной вязкости вследствие роста зерна, перегрева и полной или частичной закалки; образование горячих и холодных трещин).

Основными параметрами термического цикла околошовной зоны являются: максимальная температура нагрева; скорость нагрева в температурном интервале фазового превращения; длительность пребывания металла в температуре выше температуры конца фазового превращения; скорость охлаждения в температурном интервале соответствующего фазового превращения при охлаждении [3].

Газодинамическое охлаждение. Как описано в патентах РФ № 2232668 и США № 5296676 сварной шов и прилегающие к нему участки основного металла защищаются потоком газа, обеспечивающим горение дуги. Снизу направляется второй поток газа, обеспечивающий защиту обратной стороны шва. Снизу на кристаллизующийся металл, закристаллизовавшийся металл шва и металл в зоне термического влияния направляется и третий поток газа, направленный по отношению к потоку, защищающему обратную сторону шва, внешне коаксиально и служащий для охлаждения. Это позволяет уменьшить ширину шва, прилегающую зону термического влияния и получить в этих зонах более благоприятную структуру металла [4, 5].

Своевременное управление охлаждением зоны термического влияния сварного соединения позволяет сократить температурное воздействие на свариваемые детали. Разрабатываемый метод, отличающийся от методов, описанных в патентах РФ № 2232668 и США № 5296676, тем, что для управления температурой остывания сварных соединений использовался высокоскоростной турбулентный поток охлаждающего газа, направленный противоположно зоне сварки и со стороны сварного шва для увеличения температуры отдачи основного металла

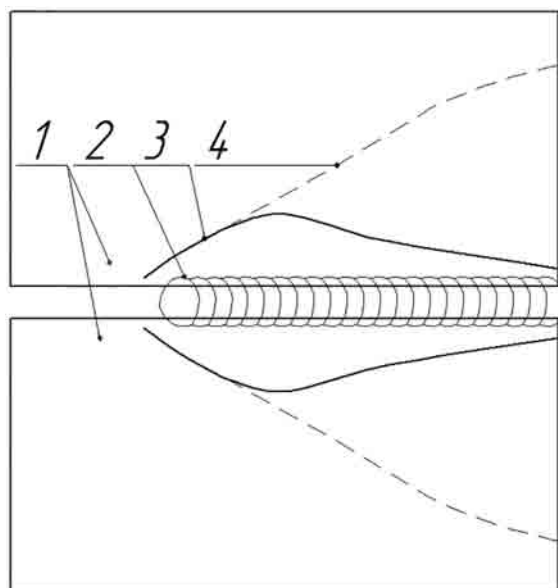
Для определения степени распространения температуры внутри свариваемых деталей произведена инфракрасная съемка процесса сварки стальных (Ст08кп) деталей. Результаты представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что после зажигания дуги температура и область термического влияния продолжают расти определенное время, затем происходит постепенное охлаждение деталей, сопровождающееся изменением структуры и возникновением деформаций. При этом видимая зона термического влияния на сваренных образцах по линейным размерам меньше, чем область температурного воздействия.

Для управления температурой остывания и охлаждением соединения был разработан метод газодинамического воздействия струи охлаж-



a



b

Рисунок 1 — Инфракрасная съемка процесса сварки стальных деталей (a); диаграмма распространения температуры (b):

1 — свариваемые детали; 2 — сварной шов;
3 — линия нагрева и остывания зоны термического влияния;
4 — линия нагрева основного металла

Figure 1 — Infrared survey of welding process of steel components (a); temperature distribution diagram (b):

1 — welded components; 2 — weld; 3 — heating and cooling line of the heat-affected zone; 4 — heating line of base metal

дающего (защитного) газа на зону термического влияния. Газодинамическое охлаждение зоны термического влияния производилось с использованием пневмопистолетов с различными размерами выходных отверстий (сопел диаметром 1 и 2 мм), т. к. прохождение охлаждающего (защитного) газа через отверстия малого диаметра обеспечивают образование турбулентного высокоскоростного потока газа, эффективность взаимодействия с зоной термического влияния которого выше воздействия защитного газа, истекающего из газовой горелки сварочной установки.

Схема установки для газодинамического охлаждения представлена на рисунке 2.

Основные параметры сварки деталей с газодинамическим охлаждением представлены в таблице.

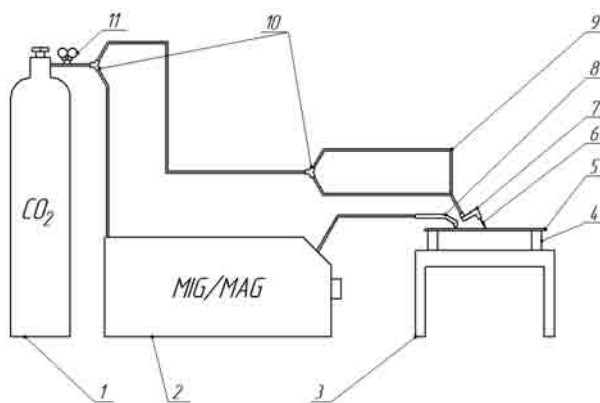


Рисунок 2 — Схема установки для газодинамического охлаждения образцов:

1 — баллон с защитным газом;
2 — сварочный полуавтомат; 3 — рабочий стол;
4 — рабочая подставка; 5 — свариваемый образец;
6 — сопло пневмопистолета; 7 — пневмопистолет;
8 — газовая горелка; 9 — пневматические рукава;
10 — пневматический тройник; 11 — редуктор с манометром

Figure 2 — Scheme of installation for gas-dynamic cooling of samples: 1 — cylinder with protective gas; 2 — welding semi-automatic device; 3 — work table; 4 — working stand; 5 — welded sample; 6 — nozzle of pneumatic gun; 7 — pneumatic gun; 8 — gas burner; 9 — compressed-air hoses; 10 — pneumatic T-joint; 11 — reducer with pressure gauge

Теплофизические свойства защитных газов оказывают большое влияние на технологические свойства дуги и форму швов. По сравнению с аргоном, гелий имеет более высокий потенциал ионизации и большую теплопроводность при температурах плазмы. При равных условиях дуга в гелии имеет более высокое напряжение, а образующийся шов имеет меньшую глубину проплавления и большую ширину. Поэтому гелий целесообразно использовать при сварке тонколистового металла. Однако, гелий легче воздуха и аргона, что требует для хорошей защиты зоны сварки его повышенного расхода (в 1,5–3 раза). Углекислый газ по влиянию на форму шва занимает промежуточное положение [6].

Расположение сопел предусматривало следующие параметры:

Таблица — Параметры сварки при газодинамическом охлаждении деталей

Table — Welding parameters for gas-dynamic cooling of components

Параметр	Значение
Свариваемый металл	Сталь Ст08кп, толщина 3 мм
Сварочная проволока	СВ08Г2С
Сила тока / напряжение сварки	220 А / 24 В
Параметры обдувающей струи:	
охлаждающий газ	CO ₂
диаметр сопла	0; 1 мм; 2 мм
расход охлаждающего газа	15 л/мин
давление охлаждающего газа	0,5 МПа
воздействие в зоне термического влияния	8 с после горения дуги

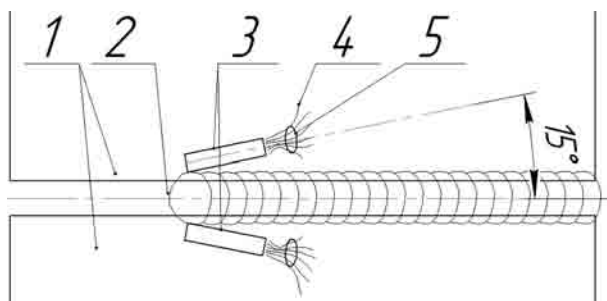
- охлаждающий газ должен обеспечивать максимальную теплоотдачу с поверхности, соответственно сопла находились на небольшой высоте от охлаждаемого металла (10–15 мм);
- охлаждающий газ должен обеспечивать максимальное охлаждение свариваемых металлов и минимальное воздействие на сварной шов, соответственно направление сопел предусматривало отклонение от сварного шва вдоль оси сварки на 15–20 градусов;
- охлаждающий газ не должен воздействовать на защитный газ, соответственно сопла наклонены в противоположную сторону от сварочной ванны вдоль горизонтальной оси образца на 30–40 градусов.

Схема расположения сопел для газодинамического охлаждения представлена на рисунке 3.

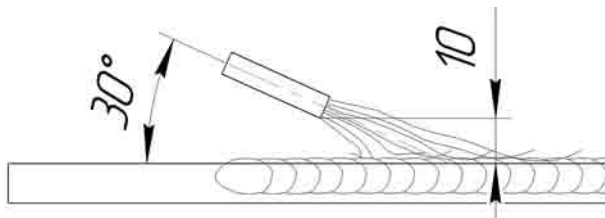
Для контроля локализации и степени охлаждения и остывания свариваемых деталей была произведена инфракрасная съемка процесса сварки с газодинамическим охлаждением. Результаты представлены на рисунке 4.

Определение локализации воздействия струи охлаждающего газа проводилось согласно изображениям, представленным на рисунке 1. Основной задачей являлось предотвращение образования участка перегрева и перекристаллизации основного металла.

Из рисунка 4 видно, что охлаждающий газ, распространяющийся через сопла высокоскоростным потоком, способствует сокращению



a



b

Рисунок 3 — Схема установки сопел для газодинамического охлаждения зоны термического влияния: *a* — вид сверху; *b* — вид сбоку; 1 — свариваемые детали; 2 — сварной шов; 3 — сопла для газодинамического охлаждения; 4 — распространение охлаждающего газа; 5 — зона контакта охлаждающего газа с основным металлом

Figure 3 — Scheme of installation of nozzles for gas-dynamic cooling of heat-affected zone: *a* — top view; *b* — side view; 1 — welded components; 2 — weld; 3 — nozzles for gas-dynamic cooling; 4 — spread of cooling gas; 5 — contact zone of cooling gas with base metal

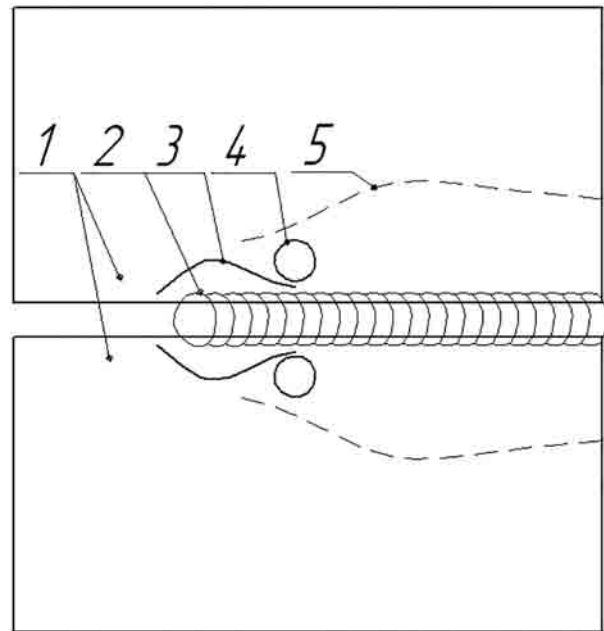
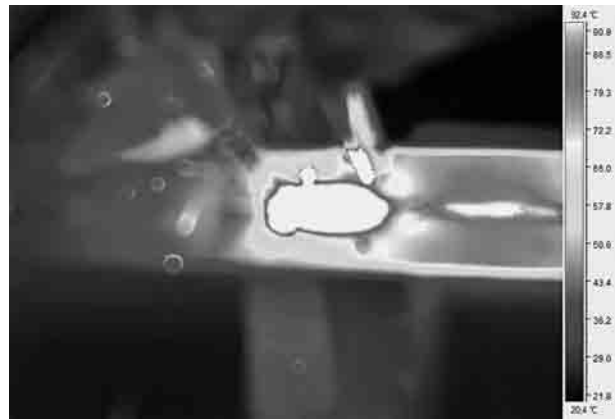


Рисунок 4 — Инфракрасная съемка процесса сварки стальных деталей при газодинамическом охлаждении: 1 — свариваемые детали; 2 — сварной шов; 3 — линия нагрева и остывания зоны термического влияния; 4 — место воздействия охлаждающего газа; 5 — линия нагрева основного металла
Figure 4 — Infrared survey of welding process of steel components at gas-dynamic cooling: 1 — welded components; 2 — weld; 3 — heating and cooling line of heat-affected zone; 4 — place of application of cooling gas; 5 — heating line of base metal

температурного влияния на околошовную зону (локации воздействия охлаждающего газа). При этом температура шва продолжает незначительно расти, но отмечается охлаждение зоны термического влияния. Струи потока охлаждающего газа направлены «от горелки», чтобы не препятствовать процессу защиты сварочной ванны.

Результаты сварки стальных пластин при различных режимах охлаждения, также без охлаждения представлены на рисунке 5.

Из рисунка видно, что динамическое воздействие струи активного газа оказывает влияние на размеры и форму зоны термического влияния сварного шва. При использовании сопла диаметром 1 мм видимая зона термического влияния сократилась вдвое; при использовании сопла диаметром 2 мм видимая зона термического влияния

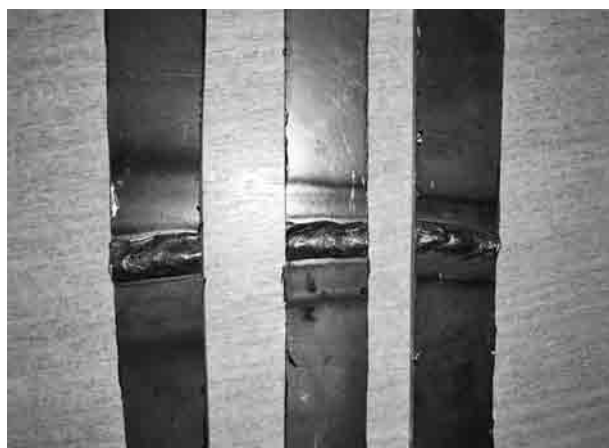


Рисунок 5 — Результаты сварки деталей (слева направо):
без охлаждения, охлаждение с соплом диаметром 1 мм,
охлаждение с соплом диаметром 2 мм

Figure 5 — Results of components welding (from left to right):
without cooling, cooling with 1 mm nozzle, cooling with 2 mm nozzle

сократилась в 3 раза. Это обусловлено тем, что при использовании сопел диаметрами 1 и 2 мм образуется турбулентный поток активного газа, но при использовании сопла диаметром 2 мм охлаждающая способность больше, т. к. увеличивается количество охлаждающего газа на поверхности.

Наблюдаемые деформации металла при сварке.

Расширение и сокращение металла вследствие неравномерного нагрева, охлаждения и структурных превращений являются основными причинами сварочных деформаций. Различают следующие виды деформаций: температурные деформации; наблюдаемые деформации, характеризующие изменение размеров тела — линейные и угловые; собственные (внутренние) деформации, которые состоят из упругих и пластических. Напряжения при сварке связаны с возникновением упругих деформаций. Наблюдаемые деформации вызывают перемещения отдельных точек сварной конструкции. Перемещения элементов сварных конструкций обычно характеризуют прогибами, углами поворота, укорочениями и величинами выхода точек из плоскости [7].

На рисунке 6 представлены результаты видимых регистрируемых деформаций плоских стальных образцов, полученных при различных режимах охлаждения деталей, так и без охлаждения.

Из рисунка 6 видно постепенное сокращение видимых деформаций в сварных соединениях. Сокращение деформаций как результат охлаждения зоны термического влияния способствует минимизации модуля внутренних напряжений сварных конструкций, а также препятствует относительному смещению точек деталей, что в свою очередь обеспечивает более точное базирование деталей при производстве сложных конструкций. Ингибция и редуцирование видимых механических деформаций также способствует увеличению предела усталостной прочности сварных конструкций.

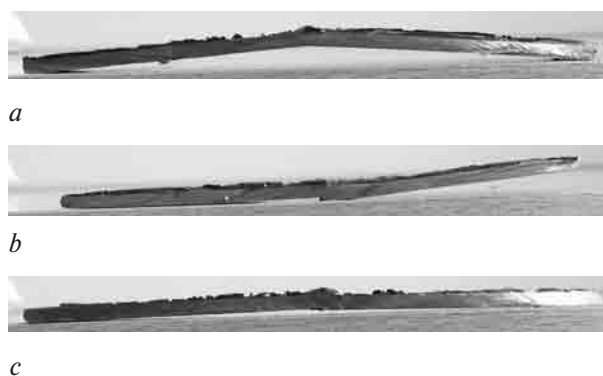


Рисунок 6 — Видимые деформации образцов:

a — без охлаждения; *b* — охлаждение с соплом 1 мм;
c — охлаждение с соплом 2 мм

Figure 6 — Visible deformation of samples: *a* — without cooling;
b — cooling with 1 mm nozzle; *c* — cooling with 2 mm nozzle

Выводы. Управление процессом электродуговой сварки позволяет достигать различных результатов. Вследствие температурного воздействия сварные соединения стальных деталей оказываются ослабевшими по сравнению с основным металлом свариваемых деталей и металлом сварного шва. Наиболее уязвимой оказывается зона термического влияния, в которой происходят фазовые структурные преобразования, температурные деформации, выгорание легирующих элементов, образование дефектов сварного шва и т. д. Для повышения физико-механических характеристик сварных соединений стальных деталей необходимо осуществлять контроль на всех этапах процесса образования соединения.

Использование защитного газа не в зоне сварки, а в зоне термического влияния для охлаждения основного металла и управления процессом фазовых превращений позволяет сократить видимую зону термического влияния свариваемых деталей. При этом, поскольку процессы формирования сварного соединения протекают быстро, процесс охлаждения участков перегрева и перекристаллизации зоны термического влияния сварного шва должен осуществляться максимально быстро, точно локализовано и не препятствовать осуществлению защиты сварной ванны защитному газу. Для максимально эффективного воздействия на зону термического влияния в качестве охлаждающего газа (хладагента) используется углекислый газ, подаваемый высокоскоростной струей через сопла малого диаметра, обеспечивающие формирование турбулентного потока.

Поведение образцов при сварке характеризуется отличительной визуализацией сокращения зоны термического влияния и уменьшения линейных температурных деформаций, которые в свою очередь являются источником избыточных напряжений в сложных сварных конструкциях.

Отличительной особенностью метода газодинамического охлаждения зоны термического

влияния сварных соединений является его относительная простота конструкции, доступность и несложность использования, что в современных условиях развития является одним из определяющих факторов внедрения новых технологий в промышленность.

Список литературы

1. Кудрявцев, И.В. Усталость сварных конструкций / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченков. — М.: Машиностроение, 1976. — 270 с.
2. Трошенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Трошенко. — Киев: Навук. думка, 1981. — 344 с.
3. Лившиц, Л.С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов. — М.: Машиностроение, 1989. — 336 с.
4. Земзин, В.Н. Термическая обработка и свойства сварных соединений / В.Н. Земзин, Р.З. Шрон. — Л.: Машиностроение, 1978. — 367 с.
5. Труфяков, В.И. Усталость сварных конструкций / В.И. Труфяков. — Киев: Навук. думка, 1973. — 216 с.
6. Сварка в машиностроении: справ. в 4-х т. / Г.А. Николаев [и др.]. — М.: Машиностроение, 1978. — Т. 1. — 504 с.
7. Hadrys, D. Mechanical properties of plug welds after micro-jet cooling / D. Hadrys // Arch. Metal. Mater. — 2016. — Vol. 61, No. 4. — Pp. 1771–1776.
8. Структурообразование и коррозионная стойкость сварных соединений из стали аустенитного класса / М.А. Кузнецов [и др.] // Технологии и материалы. — 2015. — № 2. — С. 18–24.
9. Шоршоров, М.Х. Металловедение сварки сталей и сплавов титана / М.Х. Хорошов. — М.: Наука, 1965. — 337 с.
10. Welding of aluminum powder alloy products: USA, Family ID 22051644 / Gilman; Paul S. (Rockland, NY); Assignee: Allied-Signal Inc. (Morristown, Morris, NJ). — Appl. No.: 08/063,811. — Filed: May 20, 1993.
11. Способ сварки в защитных газах с принудительным охлаждением шва и зоны термического влияния: пат. RU 2232668 / С.Н. Власов, И.Е. Лапин, А.В. Савинов, Лысак В.И., Потапов А.Н. — Опубл. 20.07.2004.
12. Акулов, А.И. Технологии и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов ВУЗов / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевиц. — М.: Машиностроение, 1977. — 432 с.
13. Сварка в машиностроении: справ. в 4-х т. / Г.А. Николаев [и др.] — М.: Машиностроение, 1979. — Т. 3. — 567 с.

ISAKAU Siarhei A., Mas. Techn. Sc.

Ph. D. Student, Senior Lecturer of the Department of Machine Science and Vehicles Technical Maintenance¹
E-mail: isakov_sa@grsu.by

LESHCHYK Siarhey D., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department of Machine Science and Vehicles Technical Maintenance¹
E-mail: s.lesh@grsu.by

¹Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus

Received 05 November 2018.

DYNAMIC IMPACT OF HIGH-SPEED COOLING GAS JET ON HEAT-AFFECTED ZONE

In the introduction the object of research is pointed – semiautomatic arc welding with a melting electrode of components from the low-carbonic steels in protective gas (GSMW). Subject of study is determination of changing the welded joints mechanic characteristics depending on ways of managing of modes of steel components welding process, and determination of ways of controlling arc welding process of the steel components. Relevance of the research consists in study and practical application of active methods of control and managing arc welding process of low-carbonic steel components with consequent reduction of the heat effect at welded joints. The scientific novelty consists in the development of a method that allows the use of protective gases to control the cooling zone of the heat effect of the weld (namely, overheating and recrystallization areas), which differs from the known methods described in the patents of the Russian Federation and the United States by the fact that the cooling inert gas acts during the achievement in the zone of heat effect of peak temperatures after the formation of the weld and is directed from the welding against the movement of the welding torch, in order to influence the process of structural transformation of the base metal, occurrence of mechanical deformations, and visible zone of heat effect. The main part of the article presents the results of dynamic impact of cooling gas on the process of arc welding of steel components. The installation designed to create the dynamic impact of cooling gas on the welded joints is described. Pictures from infrared camera are presented, with which the location of dynamic impact was defined. Process of cooling was done with using jets with different size. The analysis of results shows the significant reduction of visible size of the heat-affected zone on the welded joints. Mechanic deformations are also minimized because of cooling the heat-affected zone. The consequence of cooling is decreasing the module of the inner tension value, also minimizing the relative offset, that improves the basing of components in the welded constructions. In conclusion, it is considered that the use of protective gas outside the welding zone, and in the heat-affected zone for cooling the

base metal and controlling the process of phase transformations, reduces the visible heat-affected zone of welded components and their visible deformation.

Keywords: arc welding, protective gas, thermal deformation cycle, heat-affected zone, recrystallization area, mechanical deformations, dynamic gas cooling

References

1. Kudryavtsev I.V., Naumchenkov N.E. *Uсталост сварных конструкций* [Fatigue of welded structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 270 p.
2. Troshchenko V.T. *Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogotsiklovom nagruzhении* [Deformation and destruction of metals during the multi-cycle loading]. Kiev, Navukova dumka Publ., 1981. 344 p.
3. Livshits L.S., Khakimov A.N. *Metallovedenie svarki i termalnoy obrabotki svarnykh soedineniy* [Metal science of welding and thermal treatment of welded joints]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 336 p.
4. Zemzin V.N., Shron R.Z. *Termicheskaya obrabotka i svoystva svarnykh soedineniy* [Thermal treatment and characteristics of welded joints]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978. 367 p.
5. Trufiyakov V.I. *Uсталост сварных конструкций* [Fatigue of welded constructions]. Kiev, Navukova dumka Publ., 1973. 216 p.
6. Nikolaev G.A., et al. *Svarka v mashinostroenii. Tom 1* [Welding in mechanical engineering. Volume 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 504 p.
7. Hadrys D. Mechanical properties of plug welds after micro-jet cooling. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, vol. 61, no. 4, pp. 1771–1776.
8. Kuznetsov M.A., Kartsev D.S., Zhuravkov S.P., Barannikova S.A. Strukturoobrazovanie i korrozionnaya stoykost staley austenitnogo klassa [Structure formation and corrosion resistance of welded joints from austenitic steel]. *Tekhnicheskii i nauchno-proizvodstvennyy zhurnal. Tekhnologii i materialy* [Technical and scientific magazine. Technologies and materials], 2015, no. 2, pp. 18–24.
9. Shorshorov M.Kh. *Metallovedenie svarki staley i splavov titana* [Metal science of welding of steels and titan alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 337 p.
10. Gilman P.S. *Welding of aluminum powder alloy products*. Application USA, no. 08/063,811, 1993.
11. Vlasov S.N., Lapin I.E., Savinov A.V., Lysak V.I., Potapov A.N., Atamanyuk V.I. *Sposob svarki v zashchitnykh gazakh s prinyuditelnyim okhlazhdeniem shva i zony termicheskogo vliyaniya* [Way of shielded gas welding with forced cooling of weld and heat affected zone]. Patent RF, no. B23K9/16, 2004.
12. Akulov A.I., Belchuk G.A., Demyantsevich V.P. *Tekhnologii i oborudovanie dlya svarki plavlениem* [Technologies and equipment for welding by melting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 432 p.
13. Nikolaev G.A., et al. *Svarka v mashinostroenii. Tom 3* [Welding in mechanical engineering. Volume 3]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 567 p.