

УДК 621.791.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 40Х, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

И.Г. Олешук, С.В. Юревич, А.А. Изюмов
Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь

Для повышения качества соединений из конструкционной стали 40Х, полученных электронно-лучевой сваркой, эффективным является применение предварительного подогрева заготовок электронным лучом до температур 300–400 °С и введение присадочной ленты из титана в зону сварки. Исследовано влияние указанных технологических приемов на микроструктуру и микротвердость сварных соединений. Показано, что предварительный подогрев заготовок предотвращает формирование в сварных швах закалочных структур, а введение присадочной ленты — появление горячих трещин и других дефектов.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, сталь 40Х, микроструктура, микротвердость

DEVELOPMENT OF METHODS OF IMPROVING THE QUALITY OF 40X STEEL JOINTS OBTAINED BY ELECTRON BEAM WELDING

I.G. Oleshuk, S.V. Yurevich, A.A. Izumov
Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

To improve the quality of joints made of 40X structural steel obtained by electron beam welding, it is effective to use a number of methods, including: preheating of billets with an electron beam to temperatures of 300–400°C and placing a titanium filler tape into the welding zone. The influence of these technological methods on the microstructure and microhardness of the welded joints has been studied. It is shown that the preheating of billets prevents the formation of hardening structures in welding seams, while the placement of the filler tape into the welding zone prevents from the appearance of hot cracks and other defects.

Keywords: electron-beam welding, 40X steel, microstructure, microhardness

E-mail: i.oleshuk@mail.ru

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) обладает широкими технологическими возможностями, недоступными для других методов сварки. В зависимости от характеристик используемого обо-

рудования ЭЛС позволяет соединять за один проход металлы и сплавы в диапазоне толщин 0,1–400 мм при отношении глубины сварного шва к ширине до 50 : 1 [1, 2]. Прохождение процесса

в вакууме обеспечивает высокую чистоту материала и позволяет сваривать химически активные материалы (титан, цирконий, ванадий и др.), высокая концентрация энергии в электронном луче делает ЭЛС наиболее эффективным способом получения сварных соединений тугоплавких металлов (ниобий, тантал, молибден, вольфрам). Малый объем расплавленного металла и кратковременность теплового воздействия при ЭЛС обеспечивает незначительные термические деформации соединяемых изделий, во многих случаях не превышающие допусков на механическую обработку. Указанные достоинства привели к широкому распространению метода в авиационной, космической и энергетической областях. При этом существует потребность в получении сварных соединений с помощью ЭЛС ряда машиностроительных деталей, изготавливаемых из сталей (главным образом, конструкционных легированных и высоколегированных сталей), относящихся к категориям условно и трудно свариваемых. Сварка таких сталей, в том числе электронным лучом, приводит к возникновению холодных и горячих трещин в металле сварного шва и зоне термического влияния (ЗТВ), снижает прочность сварных соединений и может привести к разрушению конструкции.

Исследования показывают [3], что получение качественных сварных соединений конструкционных легированных сталей с помощью ЭЛС возможно при обеспечении высокой чистоты исходного металла. Рекомендуется проводить рафинирование металла с помощью электрошлакового переплава для общего снижения загрязненности, диспергирования и равномерного распределения неметаллических включений, также следует ограничить суммарное содержание фосфора и серы до 0,11 %, газов — до 60 ppm (для кислорода) и до 200 ppm (для азота). На практике данные требования не всегда выполняются.

Анализ запросов промышленных предприятий Республики Беларусь (ОАО «МТЗ», ОАО «Амкор», ОАО «МАЗ», ОАО «БЕЛАЗ») выявляет потребность в изготовлении с помощью ЭЛС ряда деталей коробок передач (зубчатые колеса, блок-шестерни, шестерни и др.), изготавливаемых из конструкционных легированных сталей 15ХГН2ТА, 25ХГМ, 25ХГТ, 20ХН3А, 45ХН2МФА, 20Х2Н4А, 40Х. Диапазон толщин свариваемых кромок для таких деталей составляет 7–20 мм, что, с учетом высоких требований к точности деталей коробок передач, делает недоступным их сварку с помощью других способов.

Анализ химических составов названных сталей путем оценки их углеродного Сэкв и серного HSC (high temperature cracking sensitivity) эквивалентов [4, 5], говорит о их высокой склонности к образованию как холодных, так и горячих трещин при сварке. Основным методом предотвращения образования холодных трещин является предварительный подогрев при сварке, который, благодаря широким возможностям нагрева электронным лучом, может быть успешно выполнен при ЭЛС. Для исключения образования горячих трещин, главной причиной которых являются легкоплавкие сульфиды, при дуговых методах сварки возможно использование ряда технологических мер: введение в сварочную ванну присадочных материалов (цирконий, титан, ванадий, ниобий), связывающих серу в тугоплавкие соединения; снижение скорости сварки при использовании коэффициента формы шва 0,5–5 [6]. Использование таких коэффициентов формы шва при сварке деталей приведет к высоким термическим деформациям.

Присадочный материал при сварке может быть введен в виде прутка, ленты, проволоки, гранул или порошка. Наибольшее промышленное применение нашла сварка с подачей присадочной проволоки. Обычно проволоку вводят в сварочную ванну позади электронного пучка под углом 15–45° к его продольной оси. При этом режим подачи выбирается так, чтобы часть проволоки расплавлялась в жидком металле ванны, а часть — непосредственно электронным пучком. При подаче присадочного металла в сварочную ванну металл верхней части сварного шва будет получать большее количество легирующих элементов, чем металл у корня сварного шва. При увеличении глубины сварного шва это будет проявляться в большей степени. Для наиболее однородного легирования металла шва между стыкуемыми поверхностями деталей помещается фольга из присадочного материала [7]. Однако, для высокоточных изделий, типа зубчатых колес и шестерен, данный метод приводит к потере точности геометрии деталей при сборке и сварке. Из перечисленных выше присадочных материалов наиболее доступным (поставляемым в виде проволоки) является титан.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния предварительного подогрева заготовок и введения присадочного материала на структуру и микротвердость сварных соединений из стали 40Х, имеющей наибольшую склонность к образованию дефектов из перечисленной выше

группы конструкционных легированных сталей. В качестве присадочного материала использовали ленту из титана марки ВТ1-0, которую располагали в выполненной по разделке свариваемых кромок проточке.

Материалы и методики

Экспериментальные образцы были изготовлены из стали 40Х (химический состав согласно ГОСТ 4543) в виде круглых дисков (Ø80 мм) толщиной 20 мм. В качестве присадочного материала использовалась лента из титана марки ВТ1-0 (площадь сечения — 0,5 мм²). Лента укладывалась в проточку, выполненную по траектории шва (рис. 1).

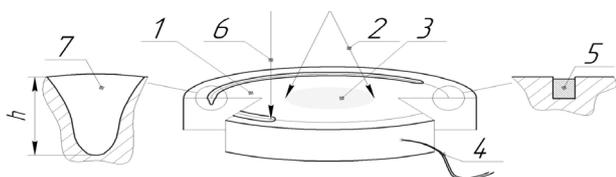


Рис. 1. Схема электронно-лучевого нагрева образца и ЭЛС:

- 1 — образец; 2 — электронный луч при нагреве;
- 3 — пятно нагрева; 4 — термопара;
- 5 — присадочная лента; 6 — электронный луч при сварке; 7 — сварной шов

Предварительный подогрев образцов осуществляли в вакуумной камере электронным лучом. Параметры электронно-лучевой воздействия были следующие: ускоряющее напряжение U — 60 кВ, ток луча I — 20 мА, ток фокусировки $I_{\text{фок}}$ — 780 мА. Схема размещения хромель-алюмелевой термопары для определения температуры предварительного подогрева в исследуемом образце показана на рис. 1. После достижения

температуры 500 °С ток луча отключали. На рис. 2 представлены зависимости температуры образца от времени при нагреве (а) и при охлаждении в вакууме $3 \cdot 10^{-3}$ Па (б, кривая 1) и на воздухе (б, кривая 2). Время воздействия электронным лучом на образец для выполнения предварительного подогрева перед сваркой выбирали на основании построенной зависимости температуры образца при нагреве. При сварке с предварительным подогревом охлаждение образцов осуществляли в вакууме. Образцы для проведения ЭЛС использовали как в состоянии улучшения (закалка от 820 °С в воду и отпуск при температуре 550 °С), так и в состоянии нормализации. Электронно-лучевую сварку образцов осуществляли по следующему режиму: ускоряющее напряжение U — 60 кВ, ток луча I — 100 мА, ток фокусировки $I_{\text{фок}}$ — 635 мА, скорость сварки $V_{\text{св}}$ — 10 мм/с.

1. Исследование влияния предварительного подогрева на структуру и свойства сварных соединений стали 40Х, полученных с помощью ЭЛС

Структуру основного металла (после улучшения — закалка 820 °С с охлаждением в воду, отпуск 2 часа при температуре 550 °С) можно охарактеризовать как отпущенный мартенсит (рис. 3), микротвердость стали составляет 2,4–2,8 ГПа.

Исследование структуры и микротвердости сварных соединений после ЭЛС с предварительным подогревом выявило, что более эффективным является подогрев до более высоких температур. Поэтому остановимся более подробно на образцах с различной исходной микроструктурой и предварительным подогревом перед ЭЛС до 300 °С.

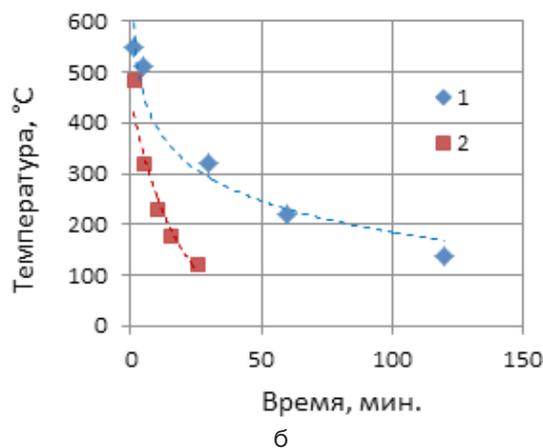
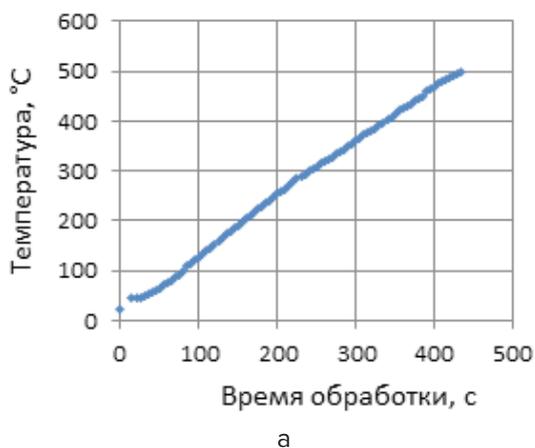


Рис. 2. Зависимость температуры образца от времени воздействия при нагреве (а) и охлаждении (б) в вакуумной камере (1) и на воздухе (2)

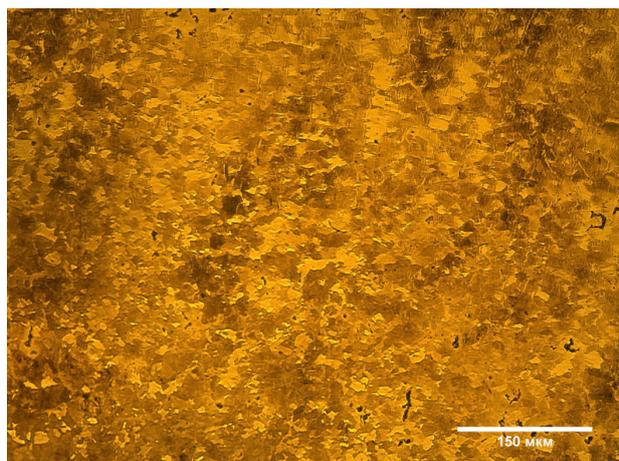
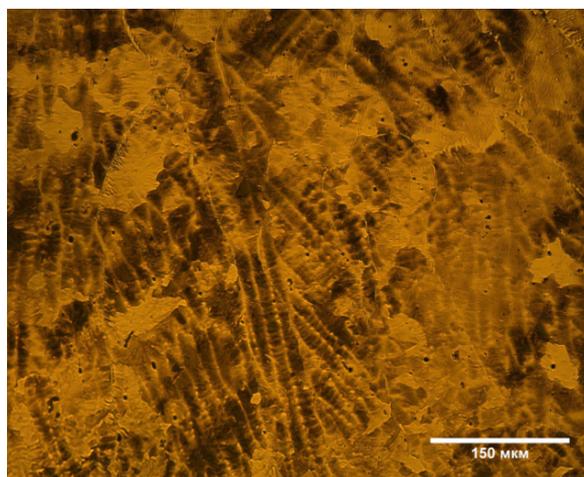


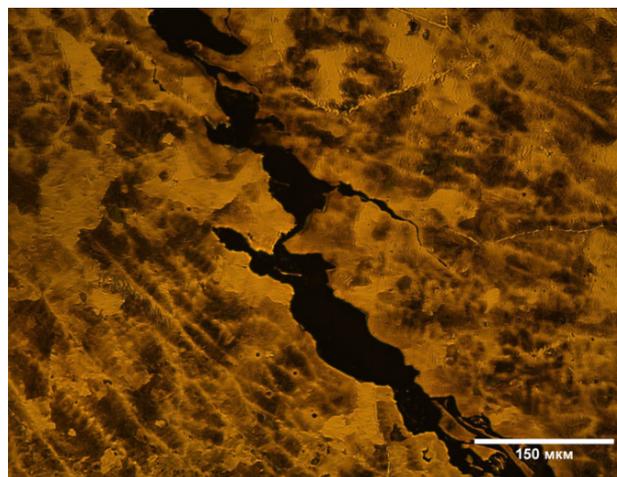
Рис. 3. Микроструктура стали 40Х после улучшения

После выполнения ЭЛС с предварительным подогревом электронным лучом на образцах с улучшенной исходной структурой получили сварной шов глубиной 8,5 мм и шириной 8 мм. В сварном шве, имеющем дендритную структуру (рис. 4 а), наблюдаются горячие трещины (рис. 4 б). Можно отметить, что после ЭЛС улучшенных образцов с предварительным подогревом трещин в объеме шва стало меньше, чем наблюдалось в ранее проведенных исследованиях без предварительного подогрева. Микротвердость в зоне сварного шва составила 2,4–2,7 ГПа.

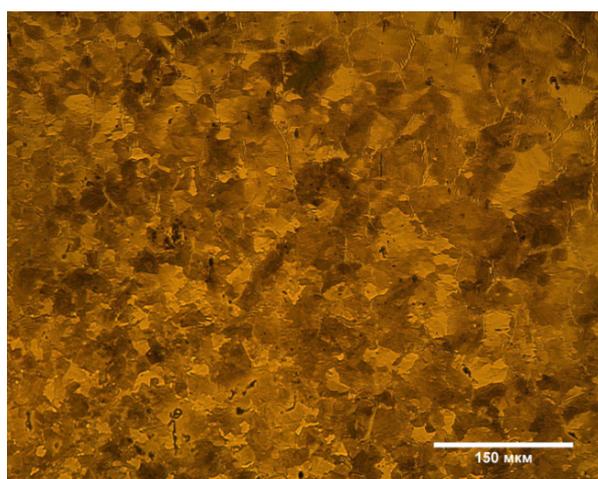
Зону термического влияния, ширина которой составляет 3 мм, можно разделить на два участка, отличающиеся микроструктурой. Микроструктура в области ЗТВ, расположенной



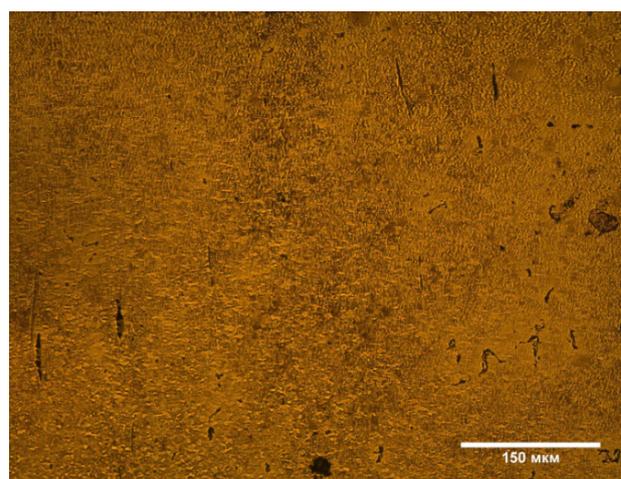
а



б



в



г

Рис. 4. Микроструктуры металла сварного шва (а, б) и зоны термического влияния (в — вблизи линии сплавления, г — со стороны основного металла) при ЭЛС стали 40Х (после улучшения) с предварительным подогревом 300 °С

вблизи линии сплавления, представлена на рис. 4 в. Микротвердость в этой области составила 2,5–2,6 ГПа. Часть ЗТВ, расположенная ближе к основному металлу, характеризуется мелкозернистой структурой (рис. 4 г). Микротвердость здесь составила 2,3–2,4 ГПа.

Таким образом, при ЭЛС с предварительным подогревом до 300 °С образцов из стали 40Х с исходной структурой после улучшения роста микротвердости в сварных швах и ЗТВ не наблюдается. При ЭЛС с предварительным подогревом 300 °С образцов с нормализованным исходным состоянием получили сварной шов глубиной 10 мм и шириной 9 мм. Параметры сварки были такими, как и в предыдущем случае. В области сварного шва наблюдаются горячие трещины (рис. 5 а), располагающиеся между ветвями столбчатых кристаллов и направленные перпендикулярно к линии сплавления. Микротвердость в зоне сварного шва — 2,4–2,7 ГПа, что незначительно превосходит микротвердость основного металла (2,2–2,4 ГПа для перлитной фазы и 1,5–1,8 ГПа для ферритной фазы).

В зоне термического влияния дефектов в виде трещин и пор не было обнаружено. Микроструктура в ЗТВ представлена на рис. 5 б.

Таким образом, в сварных соединениях образцов с исходной структурой после улучшения и нормализации, подвергнутых перед электронно-лучевой сваркой предварительному подогреву электронным лучом до 300 °С, повышения микротвердости не наблюдается, уменьшается количество и размер горячих трещин.

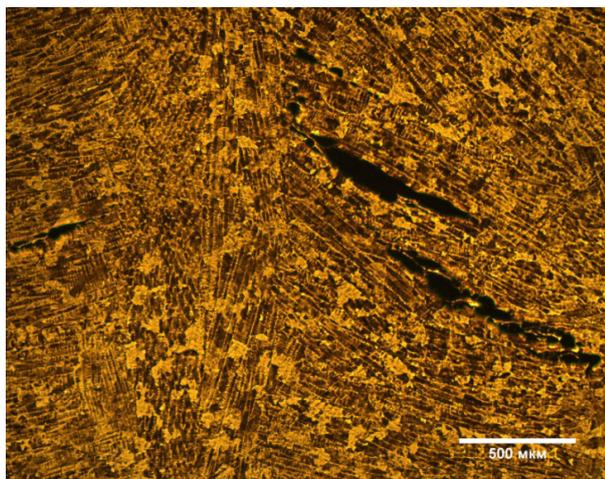
2. Исследование влияние присадки титана на структуру и свойства сварных соединений стали 40Х, полученных с помощью ЭЛС

Проведена сварка без предварительного подогрева по указанным ранее режимам образцов из стали 40Х в нормализованном состоянии с присадочной лентой из титана марки ВТ1-0.

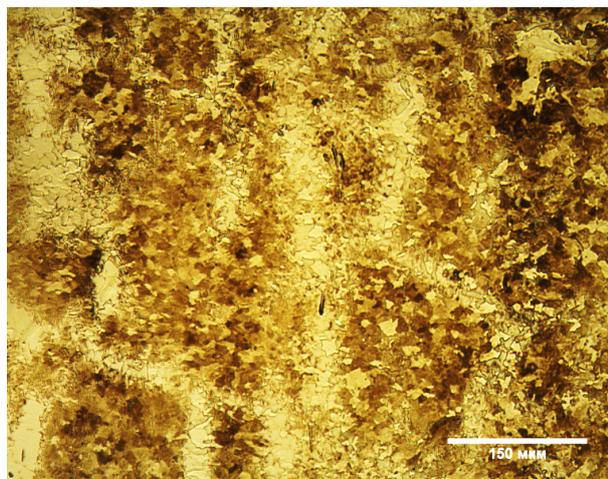
В результате получены сварные швы глубиной 7–8 мм и шириной 8–9 мм. Трещины в сварных швах отсутствуют. Титан в процессе сварки связывает серу в тугоплавкие сульфиды, и тем самым предотвращает выделение легкоплавких сульфидов железа, которые при кристаллизации металла сварного шва образуют жидкие прослойки, приводящие при возникновении растягивающих напряжений к появлению разрывов — горящих трещин.

Микроструктура сварного шва одного из образцов, которую можно охарактеризовать как мелкозернистую дендритную, показана на рис. 6 а. Также как и при ЭЛС стали без предварительного подогрева и введения титана, наблюдается значительный рост микротвердости металла в области сварного шва до 4,7–5,7 ГПа, что связано с образованием закалочных структур.

Зона термического влияния небольшая (0,5–1,5 мм), состоит из двух областей с различной микроструктурой и микротвердостью. Со стороны сварного шва наблюдается полосчатая структура, состоящая из светлых и темных фаз (рис. 6 б). Микротвердость светлых фаз составила 7,1–7,7 ГПа, темных фаз — 4,6–5,7 ГПа. Структура металла в зоне термического влияния при переходе к основному металлу показана на рис. 6 в, микротвердость составила 3,0–4,2 ГПа.



а



б

Рис. 5. Микроструктура металла сварного шва (а) и зоны термического влияния (б) при ЭЛС стали 40Х (после нормализации) с предварительным подогревом 300 °С

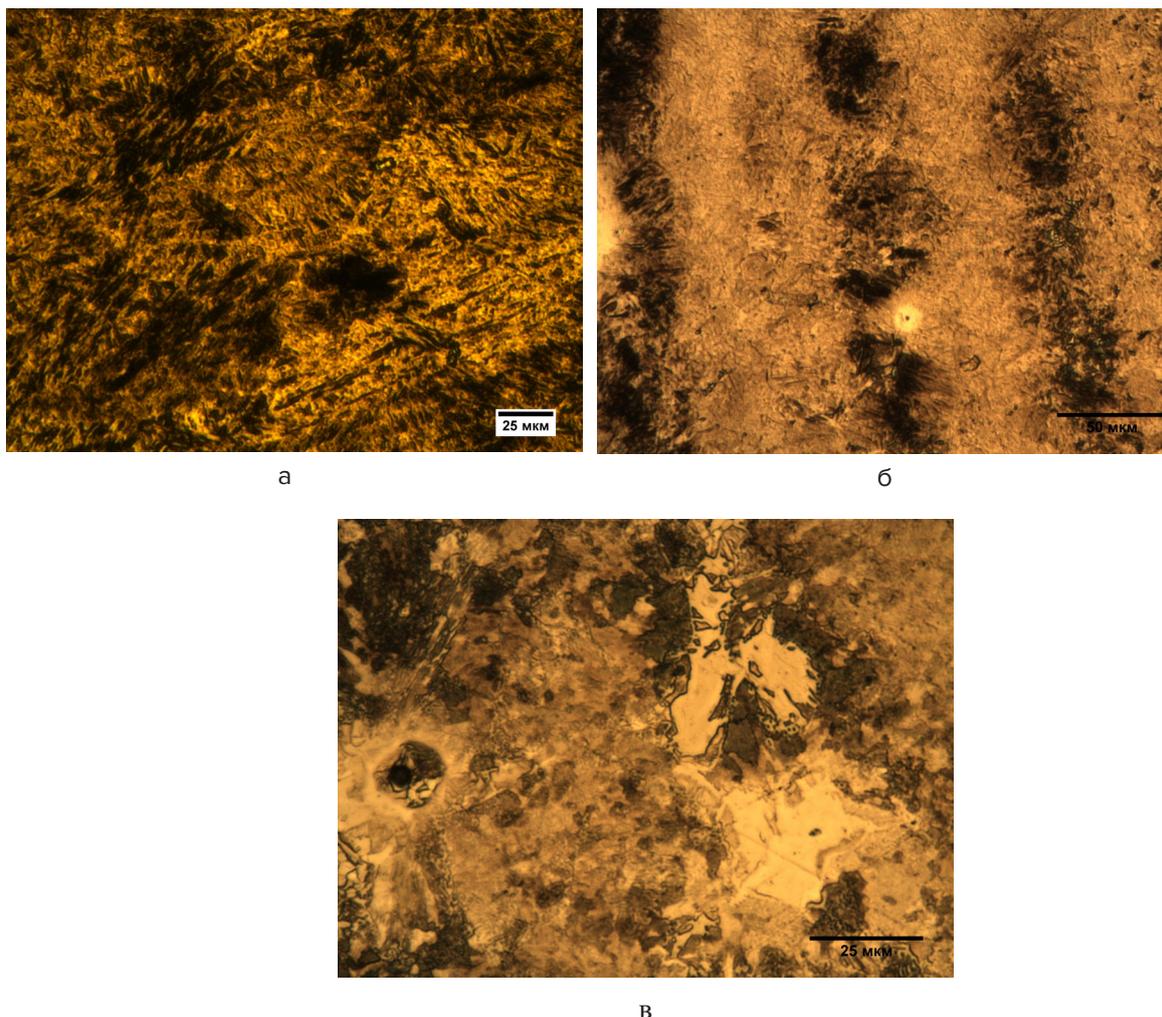


Рис. 6. Микроструктура металла сварного шва (а) и зоны термического влияния (б — со стороны сварного шва, в — со стороны основного металла) при ЭЛС стали 40Х (после нормализации) без предварительного подогрева с присадкой титана

Таким образом, при ЭЛС стали 40Х в нормализованном состоянии присадка ленты из титана ВТ1-0 в область сварного шва в количестве 0,2–0,6 об. % предотвращает образование горячих трещин и улучшает качество шва.

Заключение

Проведено исследование влияния предварительного подогрева перед электронно-лучевой сваркой на структуру и микротвердость сварных соединений из стали 40Х. Установлено, что в образцах с различной исходной структурой (после улучшения и нормализации), при ЭЛС с предварительным подогревом электронным лучом до

300 °С в сварном шве закалочные структуры не образуются, уменьшается количество и размер горячих трещин.

Введение присадки из титана марки ВТ1-0 в зону сварки в при ЭЛС без предварительного подогрева предотвращает образование горячих трещин в сварном шве, однако не устраняет формирования закалочных структур.

Указанные методы можно применять для повышения качества сварных соединений из конструкционной стали 40Х, которая часто используется на предприятиях машиностроения для изготовления деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиллер, З. Электронно-лучевые технологии / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.
2. Schultz H. Electron beam welding. Abington: Woodhead publishing Ltd., 1993, pp. 235.
3. Кайдалов, А. А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии / А. А. Кайдалов. — Киев: НТП «Инкорс», 2004. — 232 с.
4. Петров, Г.Л. Теория сварочных процессов / Г.Л. Петров, А. С. Тумарев — Москва: Высшая школа, 1977. — 392 с.
5. Лившиц, Л. С. Металловедение сварки и термической обработки сварных соединений / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов — М.: Машиностроение, 1989. — 336 с.
6. Деев, Г.Ф. Дефекты сварных швов / Г.Ф. Деев, И.Р. Пацкевич. — Киев: Наук. думка, 1984. — 208 с.
7. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко [и др.]; Под. ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.

УДК 679

ПОЛУЧЕНИЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОТХОДОВ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ А1-В

¹В.А. Глушечков, ¹Беляева И.А., ²Миронов В.А., ¹Бурмистров А.Е.

¹Самарский университет, г. Самара, Россия

²Рижский технический университет, г. Рига, Латвия

В статье представлена гибридная технология прессования порошков в металлической оболочке, включающая одновременно две операции: волочение и магнитно-импульсный обжим. Предложено несколько технологических схем осуществления данной технологии. Одна из них опробована в лабораторных условиях. Оценено качество уплотнения порошковой композиции алюминий-бор. Предложена модель продольного и радиального уплотнения при использовании статической и динамической нагрузок. Предложено использование нового технического решения при утилизации изделия из волокнистых композиционных материалов.

Ключевые слова: Волокнистый композиционный материал А1-В, утилизация изделий, дробление, измельчение, порошковая композиция, гибридная технология «волочение-магнитно-импульсный обжим», металлическая оболочка, длинномерные изделия.

OBTAINING OF LONG-SIZE PRODUCTS FROM POWDER COMPOSITIONS A1-B

¹V.A. Glushenkov, ¹I.A. Beljaeva, ²V.A. Mironov, ¹A.E. Burmistrov

¹Samara University, Samara, Russia

²Riga Technical University, Riga, Latvia

The article presents the hybrid technology of compaction of powders in a metal shell with two simultaneous operations — «drawing and pulse-magnetic reducing». Several technological schemes for implementation of this technology are proposed. One of them was tested under laboratory condition. The quality of compaction of the powder composition Al-B was evaluated. The model of longitudinal and radial compaction when using static and dynamic loads is considered. Use of the new technical decision is proposed for recycling of products from fibrous composite materials.

Keywords: Fibrous composite material Al-B, recycling of products, crushing, grinding, powder composition, hybrid technology «drawing and pulse-magnetic reducing», metal shell, long-size products.

E-mail: vgl@ssau.ru