

УДК 621.791.725;621.431.75; 669.018.44

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ ШВОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ЭД) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД

© 2016 Д.А. Баранов¹, В.Г. Климов¹, А.А. Паркин², С.С. Жаткин², А.С. Попов¹¹ ПАО «Кузнецов», г. Самара² Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 28.03.2016

Рассматривается процесс лазерной сварки различных типов сварного соединения жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ЭД) на хромоникелевой основе, используемого в производстве газотурбинных двигателей. По результатам электронной микроскопии проведен анализ структуры, формирования и кристаллизации сварного шва в процессе сварки CO₂-лазером.

Ключевые слова: лазерная сварка, жаропрочный сплав, электронная микроскопия, сварной шов, кристаллизация, сварочная ванна

Условия работы газотурбинных двигателей (ГТД) характеризуются длительным воздействием вибрационных нагрузок, высоких температур (до 900-1100°C) и агрессивных сред [1, 6]. В связи с этим конструкция таких двигателей на 40-50% состоит из жаропрочных сплавов. При изготовлении ряда узлов ГТД используют сварные соединения, к которым предъявляются повышенные требования, обеспечение которых является сложной задачей, так как с повышением жаропрочности материалов наблюдается снижение сопротивляемости образованию трещин при сварке и последующей термообработке.

Повышение качества сварных швов жаропрочных сплавов возможно за счет сокращения времени высокотемпературного нагрева путем снижения погонной энергии. В результате этого уменьшается растворение упрочняющих фаз в околошовной зоне и выпадения этой фазы в процессе охлаждения в шве [2]. Одним из способов получения качественного сварного соединения из жаропрочных сплавов является применение лазерной сварки. Лазерная сварка обладает рядом существенных преимуществ перед традиционными видами сварки: высокая концентрация энергии, небольшой объем сварочной ванны, малая ширина зоны термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения. Эти факторы обеспечивают высокую технологическую прочность сварных соединений и существенное понижение величины деформаций сварных конструкций. Поэтому процесс лазерной сварки с высокой концентрацией энергии и отношением глубины проплавления к ширине шва оказывают сильное воздействие на свариваемость жаропрочных сплавов [3].

Методика исследований. Сварка проводилась на лазерном CO₂-комплексе TruLaserCELL 7020 (TRUMPF - Германия) импульсно-периодическим

излучением с частотой следования импульсов 50...90 кГц и максимальной мощностью 4 кВт в защитном газе Не диаметром луча в фокусе 0,2-0,3 мм. Сборка образцов осуществлялась встык без разделки кромок и с имитацией замкового соединения (сварка с буртом) в стапеле с медной подложкой, как показано на рис. 1.

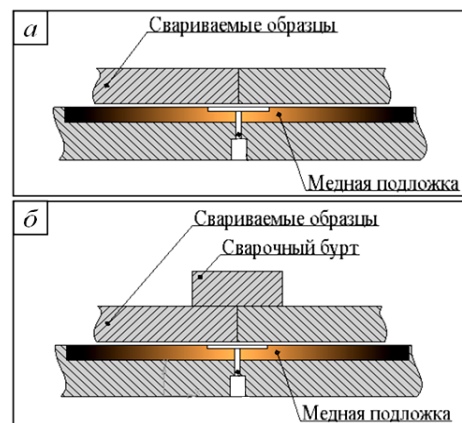


Рис. 1. Тип сварного соединения: а – стыковое соединение, б – имитация замкового соединения

образцы (заготовки) размером 200x100 мм толщиной 1,8 мм хромоникелевого сплава ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ЭД) вырезались из листового материала, прошедшего в состоянии поставки термическую обработку – закалка при температуре (1080-1100°C) с последующим охлаждением в воде или под водяным душем. Состав и процентное содержание компонентов (элементов) сплава представлены в табл. 1.

Сварка образцов производилась при скорости 40 мм/с:

- без использования присадочного материала;
- с имитацией замкового сварного соединения, в качестве материала бурта использовался хромоникелевый сплав ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ЭД). Состав и процентное содержание элементов материала сварочного бурта представлены в табл. 2;
- с непрерывной подачей присадочной проволоки св.06Х15Н60М15 (ЭП 367) в ванну расплава. Состав и процентное содержание элементов материала присадочной проволоки представлены в табл. 2.

После сварки часть образцов была подвержена последующей термической обработке (ТО): закалка + старение, охлаждение на воздухе (рекомендуемый

Баранов Дмитрий Александрович, инженер-технолог бюро сварки. E-mail: D.Baranov91@mail.ru

Климов Вадим Геннадьевич, начальник бюро сварки. E-mail: vladim3945@yandex.ru

Паркин Анатолий Алексеевич, кандидат технических наук, профессор кафедры литейных и высокоэффективных технологий. E-mail: laser@samgtu.ru

Жаткин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры литейных и высокоэффективных технологий. E-mail: sergejat@mail.ru

Попов Александр Сергеевич, инженер-технолог бюро оборудования и новых технологических процессов. E-mail: popov1106@mail.ru

режим термической обработки согласно ПИ 1.4.75.2000 [4]). Электронная микроскопия сварного шва производилась на электронном микроскопе Tescan VEGA3 LM с

модулем для элементного анализа Oxford instruments X-Max компании TESCAN (Чехия).

Таблица 1. Жаропрочный сплав ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ЭД) (ТУ 14-1-1960-2004)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	W	Mo	Co	Al	Ti	Fe	B	Ce
не более					17,0 - 20,0	основа	5,0- 7,0	3,0- 5,0	5,0- 8,0	1,6- 2,3	1,1- 1,6	не более		
0,10	0,50	0,40	0,15	0,015								5,0	0,05	0,05

Таблица 2. Сварочная проволока св.06X15H60M15 (ЭП-367) (ГОСТ 2246-70)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe
не более		1,0-2,0	14,0- 16,0	основа	14,0- 16,0	не более		
0,08	0,50					0,015	0,015	4,00

Результаты исследований и их анализ. Вне зависимости от типа сварного соединения CO₂-лазерная сварка в стапеле с медной подложкой и высокой концентрацией сфокусированного лазерного излучения формирует сварной шов в виде «песочных часов» (рис. 2). При сварке пластин встык без присадочного материала наблюдается образование усачных каверн сверху шва и вогнутость в его корне. Также возникает смещение пластин в результате деформаций при кристаллизации (рис. 2а). В случае сварки с наложением бурта (рис. 1б) происходит несимметричное проплавление бурта: в сварном шве наблюдается несплавление бурта со свариваемой заготовкой и его деформация. При лазерной сварке с присадочной проволокой наблюдается усиление сварного шва на поверхности и в корне шва (рис. 2в).

В целом при лазерной сварке с высокой концентрацией сфокусированного лазерного излучения при высоких скоростях формируется структура, характерная для сварки «кинжальным» проплавлением (см. рис. 2а и 2б). Наличие парового канала дает возможность лазерному излучению проникать вглубь свариваемого материала с образованием узкого шва с большим отношением глубины к ширине. За счет кинжального проплавления сварочной ванны паровой канал может достигать канавки между медной подкладкой и свариваемыми заготовками. Таким образом, при высоких скоростях сварки возможными причинами формирования шва характерной формы может являться образование поверхностной плазмы, парового канала и плазмы, возникающей в корне шва [5].

При сварке пластин встык без присадочного материала наблюдается образование усачных каверн

сверху шва и вогнутость в его корне. Также возникает смещение пластин в результате деформаций при кристаллизации (рис. 2а). В случае сварки с наложением бурта (рис. 1б) происходит несимметричное проплавление бурта: в сварном шве наблюдается несплавление бурта со свариваемой заготовкой и его деформация. При лазерной сварке с присадочной проволокой наблюдается усиление сварного шва на поверхности и в корне шва (рис. 2в).

В целом при лазерной сварке с высокой концентрацией сфокусированного лазерного излучения при высоких скоростях формируется структура, характерная для сварки «кинжальным» проплавлением (см. рис. 2а и 2б). Наличие парового канала дает возможность лазерному излучению проникать вглубь свариваемого материала с образованием узкого шва с большим отношением глубины к ширине. За счет кинжального проплавления сварочной ванны паровой канал может достигать канавки между медной подкладкой и свариваемыми заготовками. Таким образом, при высоких скоростях сварки возможными причинами формирования шва характерной формы может являться образование поверхностной плазмы, парового канала и плазмы, возникающей в корне шва [5].

Микроструктура сварного шва стыкового соединения без подачи присадочной проволоки в ванну расплава и замкового соединения представлена на рис. 3. При лазерной сварке без присадочной проволоки: в верхней части сварного шва около границы сплавления наблюдаются участки неравноосной кристаллизации с разной длиной дендритов. Микроструктура в зоне термического влияния крупнозернистая.

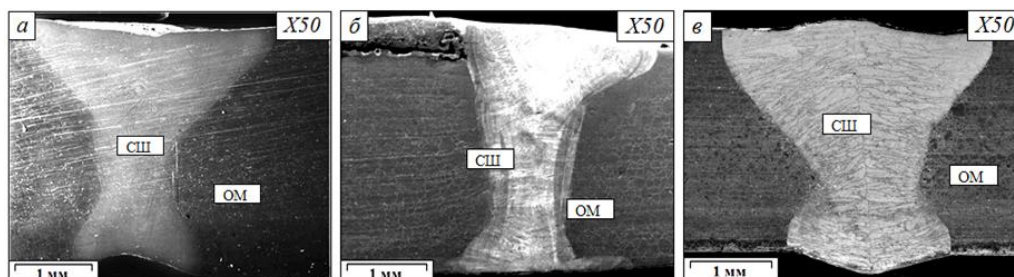


Рис. 2. Макроструктура сварного шва: а – без присадочного материала, б – имитация замкового соединения, в – с присадочной проволокой

При сварке с дополнительной пластиной над стыком свариваемых пластин (см. рис. 4) (имитация замкового соединения) формируемая дендритная структура имеет неравноосные участки с разной длиной дендритов, то есть процесс кристаллизации протекал в

течение различного времени и, по-видимому, с различной скоростью. В верхней части сварного шва, где происходило проплавление дополнительной горизонтально расположенной пластины, наблюдается разнонаправленная дендритная структура различной длины,

что может быть связано отводом тепла в поверхностном направлении пластины и дополнительном охлаждении защитным газом. В целом при сварке замкового соединения из-за небольшой зоны проплавления материала верхней пластины на поверхности шва происходит частичное расплавление замка и образование несплавления сварочного бурта с основным металлом (см. рис. 26).

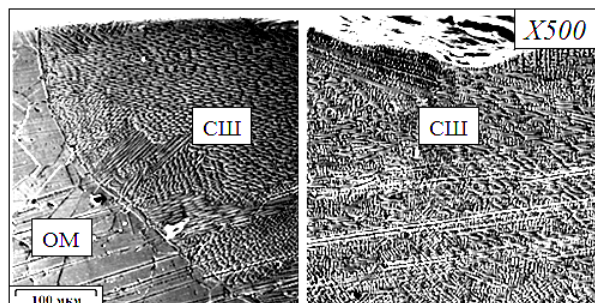


Рис. 3. Микроструктура верхнего участка сварного шва, полученного лазерной сваркой без присадочной проволоки

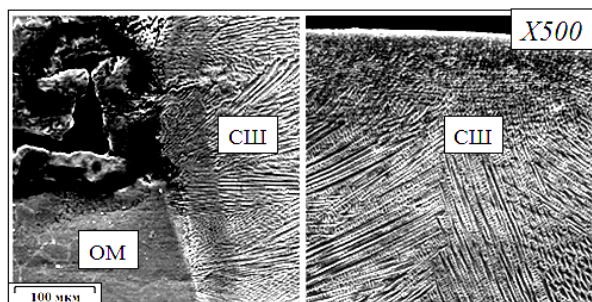


Рис. 4. Микроструктура верхнего участка сварного шва, полученного лазерной сваркой с имитацией замкового соединения

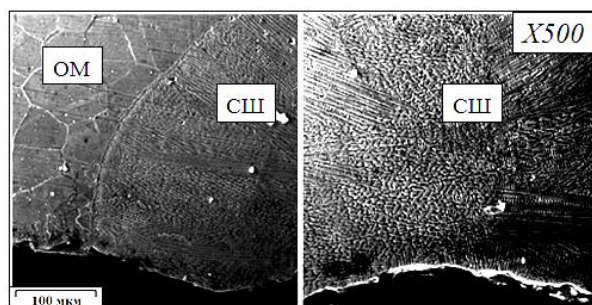


Рис. 5. Микроструктура нижнего участка сварного шва, полученного лазерной сваркой без присадочной проволоки

Также при сварке замкового соединения возникает вероятность промаха по стыку сварного соединения и образованию дефекта сварки в корне шва в виде непровара.

В микроструктуре лазерного сварного шва, полученного без использования присадочной проволоки (рис. 5), наблюдается крупнозернистая структура в зоне термического влияния, четкая граница зоны сплавления и ориентированная под разными углами дендритная структура непосредственно в зоне сварного шва. Последнее может быть связано с разориентировкой зерен ЗТВ, от которых происходил рост дендритов. При сварке с дополнительной пластиной сверх стыка

свариваемых пластин в нижней части зоны сварного шва формируется несколько отличная микроструктура (см. рис. 6). В зоне термического влияния крупнозернистая структура (по-видимому, аустенит) вытянута к корню сварного шва, непосредственно на границе с зоной сплавления формируется мелкозернистая структура. Структура сварного шва разноразовная. В центре сварного шва сформирована дендритная структура с достаточно большой длиной дендритов, причиной чего стал тот факт, что процесс кристаллизации протекал намного медленнее, чем на краю сварного шва. В нижней части сварного шва на границе с медной подкладкой формируется достаточно мелкозернистая структура с дендритами короткой длины.

Одним из способов предупреждения образования вышеуказанных дефектов лазерной сварки стыковых соединений является непрерывная подача присадочной проволоки в ванну расплава. При подаче присадочной проволоки происходит усиление сварного шва (см. рис. 2), что приводит к повышению его прочностных характеристик. Микроструктура сварного шва стыкового соединения, сформированного с использованием непрерывной подачи присадочной проволоки в ванну расплава, до термообработки и после нее представлена на рис. 7.

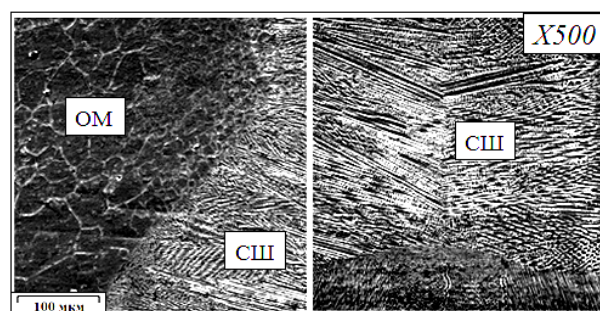


Рис. 6. Микроструктура нижнего участка сварного шва, полученного лазерной сваркой с имитацией замкового соединения

В процессе кристаллизации рост дендритов происходит в направлении края сварного шва перпендикулярно теплоотводящей поверхности, а также от зоны сплавления к центру сварного шва, где образовался паровой канал. Высокие скорости сварки сформировали «зону слабину» — стык двух фронтов роста дендритов. Направленная кристаллизация, наблюдаемая в микроструктуре сварного шва, может повышать предел выносливости и другие свойства. В микроструктуре (ближе к центру) сварного шва наблюдаются нитевидные кристаллы, которые могут обеспечить более высокую жаропрочность материала сварного шва. Интенсивный отвод тепла в основной металл (ОМ) сокращает размеры зоны термического влияния (ЗТВ) и формирует мелкодендритную структуру литой зоны сварного шва (см. рис. 8а) за счет высоких скоростей сварки.

Результаты исследования микроструктуры сварного шва после термической обработки представлены на рис. 8б. Термическая обработка стабилизирует структуру сплавов, увеличивает объемное содержание γ' -фазы, уменьшает степень её неоднородности по химическому составу и по размерам, снижает уровень ликвации, что в итоге приводит к существенному повышению характеристик долговечности. Морфология частиц γ' -фаз и карбидов в значительной мере зависит от термической обработки и ее длительности и регулирует

свойства сплавов. Длительность тепловых выдержек приводит к укрупнению размеров частиц γ' -фазы и вызывает реакции, происходящие в первую очередь по

границам зерен. Образовавшиеся после термообработки крупные зерна, по-видимому, соответствуют γ' -фазе с выделениями карбидов по границам зерен.

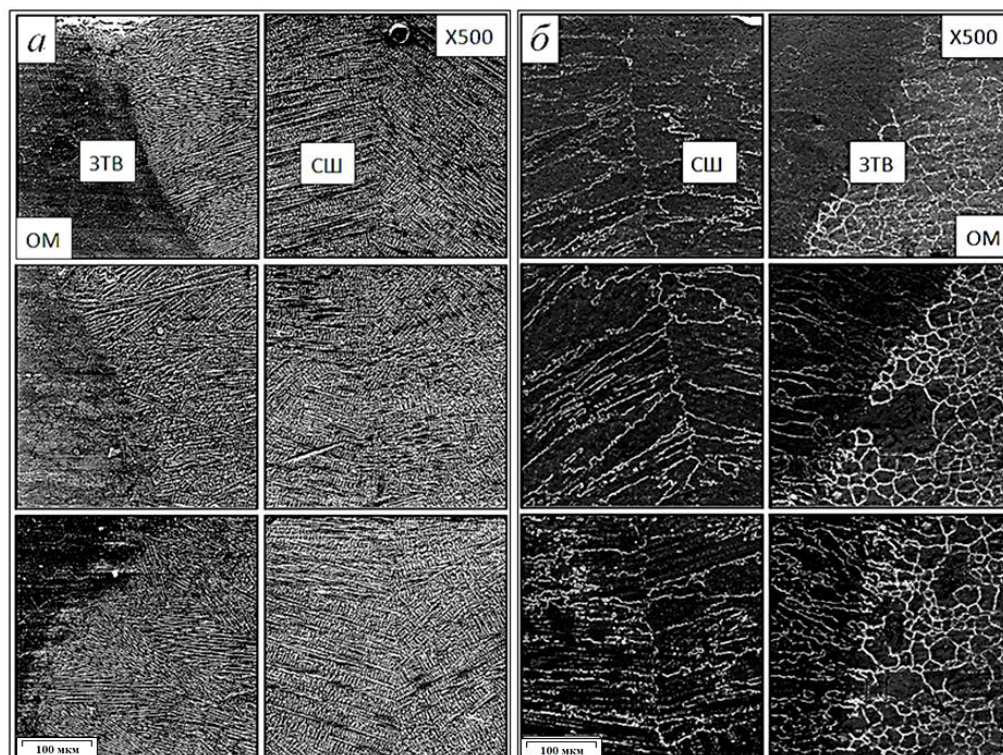


Рис. 7. Микроструктура сварного шва стыкового соединения с использованием непрерывной подачи присадочной проволоки в ванну расплава: а – до ТО, б – после ТО

После термообработки в зоне термического влияния наблюдается образование глобулярных зерен, предположительно, аустенитной фазы, которые не наблюдались после сварки до термообработки. Обычно применяемая после сварки гетерогенных дисперсионно-упрочняемых сплавов термообработка (закалка с последующим старением) привела к частичному растворению и последующему росту зерен и формированию дендритной структуры с длинными дендритами (см. рис. 8б).

Выводы:

1. Процесс сварки лучом импульсно-периодического CO_2 -лазера характеризуется образованием зоны термического влияния размерами существенно меньше ширины сварного шва. При этом не наблюдается укрупнение зерна основного металла (ХН68ВМТЮК-ВД) в этой зоне. Этот эффект может приводить к повышению прочности сварной конструкции.

2. Лазерная сварка без присадочной проволоки приводит к образованию каверны в верхней части сварного шва и вогнутости в нижнем участке сварного шва, что в целом вызывает ослабление сварного шва и, соответственно, всей сварной конструкции.

3. Лазерная сварка с имитацией замкового соединения увеличивает вероятность образования дефектов сварки в виде несплавления и несплавления бурта с основным материалом, из-за высокой локальности лазерного излучения и к деформации свариваемых пластин. Это приводит к ослаблению сварной конструкции.

4. Термическая обработка в виде закалки с последующим старением стабилизирует структуру жаропрочного сплава, которая представляет собой ГЦК-решетку, содержащую карбиды и интерметаллидную γ' -фазу, что привело к увеличению объёмного содержания γ' -фазы, прочность которой возрастает с ростом температуры, а ее наследственная пластичность препятствует охрупчиванию сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сорокин, Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. 1997. №4. С. 21.
2. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов. Под ред. А.Г. Григорьянца. -2-е изд., стереотип. / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.
3. Moosavy, H.M. Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloys / H.M. Moosavy, M.R. Aboutalebi, S.H. Seyedein et al. // Optics & Laser Technology. 2014. V.57, P. 9.
4. ПИ 1.4.75-2000 – Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов. – М.:ОАО «НИАТ».
5. Федоров, Б.М. Влияние параметров лазерной сварки на прочность соединений никелевых сплавов / Б.М. Федоров, А.И. Мисюров // Технология машиностроения. 2011. №11. С. 44-45.
6. Климов, В.Г. Особенности восстановления геометрии пера газотурбинного двигателя методом лазерной порошковой наплавки / В.Г. Климов, С.С. Жаткин, Е.Ю. Щедрин, А.В. Когтева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, №2(4). С. 782-788.

**RESEARCH THE STRUCTURE OF WELDED SEAMS CREATED BY LASER WELDING
OF HEAT RESISTING ALLOY HN68VMTYUK-VD (EP693-ED) AT PRODUCTION
THE DETAILS AND HUBS OF GAS-TURBINE ENGINE**

© 2016 D.A. Baranov¹, V.G. Klimov¹, A.A. Parkin², S.S. Zhatkin², A.S. Popov¹

¹ PJSC "Kuznetsov", Samara

² Samara State Technical University

Process of laser welding of various types of welded types of heat resisting alloy HN68VMTYuK-VD (EP693-ED) on chrome-nickel basis used in production of gas-turbine engines is considered. By results of electronic microscopy the analysis of structure, formation and crystallization of welded seam in the course of welding by the CO₂-laser is carried out.

Key words: laser welding, heat resisting alloy, electronic microscopy, welded seam, crystallization, welding bathtub

*Dmitriy Baranov, Engineer at Welding Bureau. E-mail: D.Baranov91@mail.ru;
Vadim Klimov, Chief of the Welding Bureau. E-mail: vadim3945@yandex.ru;
Anatoliy Parkin, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Welding and High-Performance Technologies. E-mail: laser@samgtu.ru;
Sergey Zhatkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Welding and High-Performance Technologies. E-mail: sergejat@mail.ru;
Alexander Popov, Engineer at the Equipment and New Technological Processes Bureau. E-mail: popov1106@mail.ru*