



УДК 621.791

**АРГОНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ВЫСОКОПРОЧНОЙ
ЦЕМЕНТУЕМОЙ СТАЛИ ВНС-63**

В.И. Лукин

доктор технических наук

И.П. Банас

кандидат технических наук

В.Г. Ковальчук

Е.В. Голев

Август 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№8, 2013 г.

АРГОНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЦЕМЕНТУЕМОЙ СТАЛИ ВНС-63

Подобран режим сварки стали ВНС-63. Проведены исследования сварных образцов из стали ВНС-63. Исследованы свойства и структура сварных соединений, влияние сварки и термической обработки на механические свойства сварных соединений из стали ВНС-63.

Ключевые слова: *аргоно-дуговая сварка, сварные соединения, термическая обработка, цементация, стойкость против образования горячих трещин, прочность, ударная вязкость, многоцикловая усталость.*

TIG WELDING OF HIGH-STRENGTHENED CEMENTED STEEL VNS-63

The parameters of TIG welding technology of steel VNS-63 samples were selected. Investigation of welded samples made from VNS-63 were conducted. Mechanical properties and structure of welded samples, the influence of welding technology and heat treatment on the mechanical properties were investigated.

Key words: *TIG welding, welded samples, heat treatment, cementation, hot cracks resistance, strength, impact strength, high cycle fatigue.*

В настоящее время авиационная промышленность остается одним из высокотехнологичных секторов экономики, потребляющих наукоемкую продукцию [1]. Для дальнейшего развития с целью сохранения паритета на международной арене необходимо определить перспективные и стратегически важные направления развития материалов и технологий их переработки. Технологии сварки являются жизненно важными для успешного достижения целей в рамках стратегических направлений [1]. Разработка технологий соединения современных и перспективных материалов с обеспечением высокого уровня прочности позволит существенно повысить тактико-технические характеристики перспективных образцов новой техники [1, 2]. Поэтому

развитие технологий сварки является одним из приоритетных направлений развития материалов и технологий их переработки до 2030 года [1, 2]. Несмотря на то, что в обозримом будущем высокотехнологичные методы сварки, такие как электронно-лучевая, лазерная, гибридная, плазменная, трением с перемешиванием, линейная, займут приоритетные позиции для обеспечения высоких прочностных свойств соединений конструкционных материалов, являющихся, как правило, ограниченно свариваемыми в силу структурных и химических особенностей, методы аргоно-дуговой сварки еще длительное время будут широко использоваться [3, 4].

Сегодня использование этих методов при сварке сталей со специальными свойствами, в том числе с цементированным поверхностным слоем [5], дает возможность получать высокие механические свойства на уровне, близком к уровню основного материала [6]. В ВИАМ проводились работы по выбору оптимальной технологии аргоно-дуговой сварки полуфабриката из коррозионнотойкой стали ВНС-63. Данные по проводимым исследованиям и полученным результатам приведены далее.

Материалы и методы исследований

Сталь ВНС-63 (15X15H3K3BM2ФБА) предназначена для высоконагруженных деталей различного назначения, подвергаемых поверхностному упрочнению посредством химико-термической обработки, работающих на воздухе в общеклиматических условиях при температурах от -55 до +500°C, а также в среде масел и топлива.

Высокопрочная коррозионнотойкая сталь ВНС-63, обладающая высокой прочностью, удовлетворительной пластичностью и вязкостью, является перспективным материалом для сварных конструкций, работающих в общеклиматических условиях. Однако сварка плавлением может оказывать значительное влияние на ее структуру и свойства [7].

Одним из целесообразных и наиболее часто применяемых в промышленности способов сварки сталей толщиной до 20 мм является аргоно-дуговая сварка неплавящимся электродом с использованием присадочного материала [8]. В качестве присадочного материала для сварки стали ВНС-63 использовался основной материал в виде прутка квадратного сечения со стороной до 3 мм.

Образцы из стали ВНС-63 для исследований изготавливали из прессованного прутка $\varnothing 50$ мм. Пруток резали на заготовки и ковали на сутунки толщиной 40 мм. Послековки сутунки подвергали чистовой обработке, прокатывали на толстые листы толщиной 16 и

18 мм и лист толщиной 3 мм, затем термообрабатывали под сварку по режиму: нормализация+отпуск.

Лист толщиной 3 мм после этого подвергали травлению и рубили на гильотинных ножницах на заготовки размером 50×50 мм (для исследования склонности к образованию горячих трещин) и на присадочный материал сечением 3×3 мм. Листы толщиной 16 и 18 мм резали на заготовки шириной 60 мм, длиной 150 мм. Далее механически обрабатывали кромки до U-образной поверхности по длинной стороне. После зачистки и обезжиривания заготовки сваривали ручной аргоно-дуговой сваркой при токе прямой полярности (с использованием источника Lincoln Electric Precision TIG 375) с присадочным материалом из стали ВНС-63 – для дальнейшего исследования механических свойств и микроструктуры. Сварные стыки подвергали рентгеновскому контролю, в результате которого были обнаружены типичные дефекты сварных швов допустимых размеров. Качество сварных соединений было признано удовлетворительным.

При испытании на стойкость к образованию горячих трещин использовали установку, изготовленную в МГТУ им. Н.Э. Баумана – ЛТП1-6, на которой растяжение образцов в процессе сварки производится в направлении перпендикулярном направлению сварки. Методика исследования является универсальной для испытаний различных сплавов, как с присадочным материалом, так и без него. В качестве критерия используется максимальная (критическая) скорость деформации $v_{кр}$, при которой в образце не образуется трещина.

Исследовались характеристики прочности при температурах +20, +300, -55°С и ударной вязкости при температурах +20 и -55°С.

Структурные исследования сварных соединений проводили методом металлографии с помощью оптического микроскопа Olympus GX51. Для выявления структуры образцы травили электролитически в 10%-ном растворе щавелевой кислоты.

Испытания на МнЦУ проводили на машине МВИ611М в условиях чистого изгиба с вращением при частоте 50 Гц и коэффициенте асимметрии цикла $R=-1$.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследовали механические свойства (σ_b , КСЧ) сварных соединений после упрочняющей термической обработки: нормализация+отпуск+закалка+отпуск. Испытания сварных соединений из стали ВНС-63 на растяжение при температурах +20,

+300, -55°C (табл. 1) показали, что значения прочности после сварки составляют:

$$\sigma_{\text{в.св}}^{20^\circ} = 1505 \text{ МПа}, \sigma_{\text{в.св}}^{300^\circ} = 1225 \text{ МПа}, \sigma_{\text{в.св}}^{-55^\circ} = 1595 \text{ МПа}.$$

Испытания образцов по сварному шву на ударный изгиб при температурах +20 и -55°C показали более низкие значения ударной вязкости по сравнению с основным материалом: $KCU^{+20^\circ} = 320 \text{ кДж/м}^2$, $KCU^{-55^\circ} = 137 \text{ кДж/м}^2$. Разрушение хрупкое, по механизму отрыва с отсутствием участков среза (см. табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства* сварных соединений стали ВНС-63

Температура испытаний, °С	Предел прочности $\sigma_{\text{в.св}}$, МПа	$K = \sigma_{\text{в.св}} / \sigma_{\text{в}}$	Ударная вязкость KCU , кДж/см ²
+20	<u>1490–1520</u> 1505	0,96	<u>252–389</u> 320
+300	<u>1140–1310</u> 1225	0,90	–
-55	<u>1590–1600</u> 1595	0,99	<u>125–150</u> 137

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) проводились на гладких корсетных образцах, изготовленных из сварных соединений стали ВНС-63 после термообработки (нормализация+отпуск+закалка+отпуск) и цементации при температурах +20 и +300°C, на базе $2 \cdot 10^7$ циклов. Сварной шов совпадал с минимальным сечением образца $d = 7,5 \text{ мм}$ [9–13].

По результатам испытания определены средние значения пределов выносливости сварных образцов (табл. 2).

Таблица 2

Пределы многоцикловой усталости сварных образцов из стали ВНС-63

Состояние материала образцов	Температура испытания, °С	Среднее значение предела выносливости σ_{-1} , МПа (на базе $2 \cdot 10^7$ циклов)
Сварка+термообработка	20	500
	300	400
Сварка+термообработка+цементация	300	440

Проведенные исследования структуры сварных соединений показали, что микроструктура сварного шва без термической обработки отличается неоднородностью. В сварном шве зерно значительно мельче, чем в околошовной зоне,

где размеры зерен достигают 0,2–0,25 мм (рис. 1). Термическая обработка существенно выравнивает структуру, но границы крупных зерен в зоне термического влияния сохраняются (рис. 2).

Длительный нагрев при цементации приводит к некоторому росту зерна в сердцевине сварного шва и выявляет границы крупных зерен в зоне термического влияния (рис. 3) [14]. Цементованный слой в сварном шве мелкозернистый, с большим количеством карбидов, характерным для высокохромистых сталей. До глубины 0,6–0,7 мм распределение карбидов относительно равномерное, затем карбиды залегают преимущественно по границам зерен и около них. На глубине 1,1–1,3 мм – мелкодисперсная переходная зона (рис. 4).

В зоне термического влияния наблюдается фрагментация крупных зерен исходного размера (рис. 5). Такая структура склонна к трещинообразованию (рис. 6). В связи с этим целесообразно защищать от цементации зону сварного шва гальваническим никелем или медью толщиной от 30 до 60 мкм [15].

Исследования образцов из стали ВНС-63 толщиной 3 мм на стойкость к образованию горячих трещин проводили на установке ЛТП1-6 на выбранном режиме. Исследование показало удовлетворительный уровень критической скорости деформации в процессе сварки – $v_{кр}=5,2$ мм/мин.

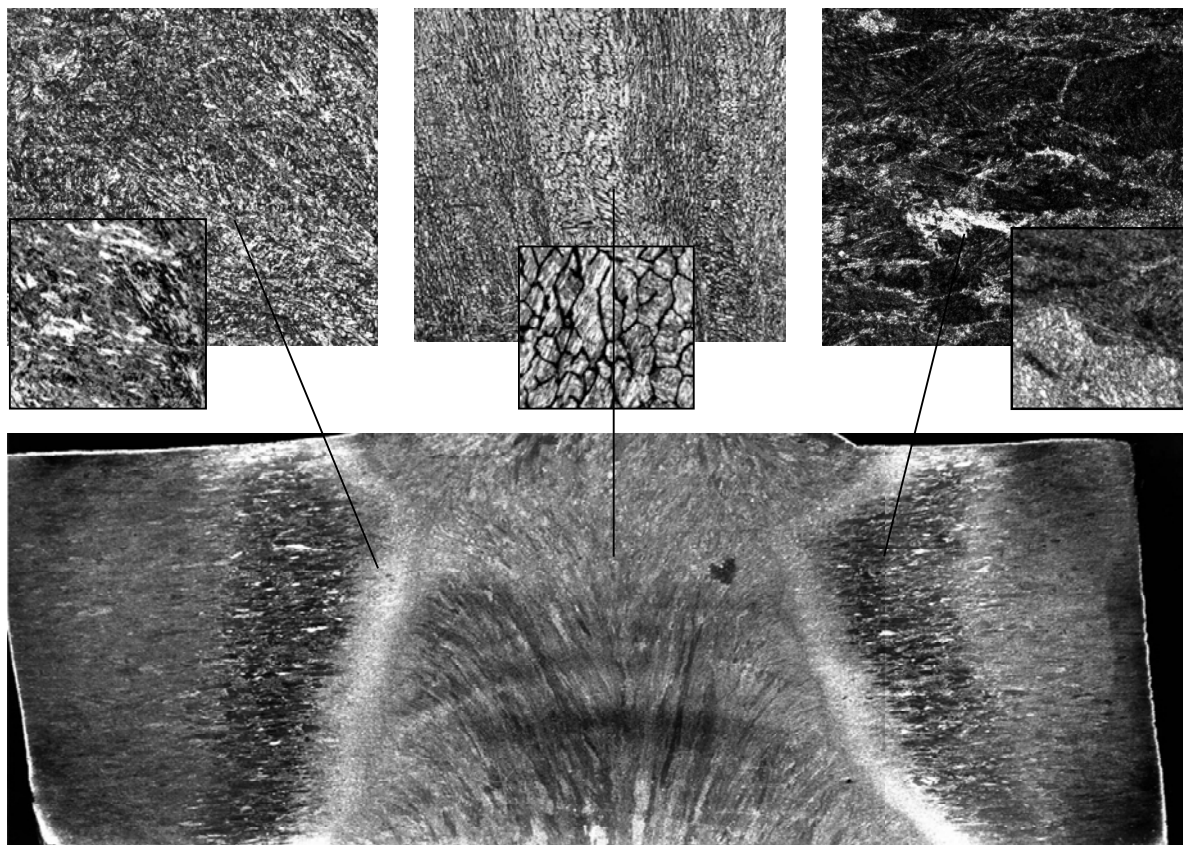


Рисунок 1. Микроструктура сварного шва стали ВНС-63 без термической обработки

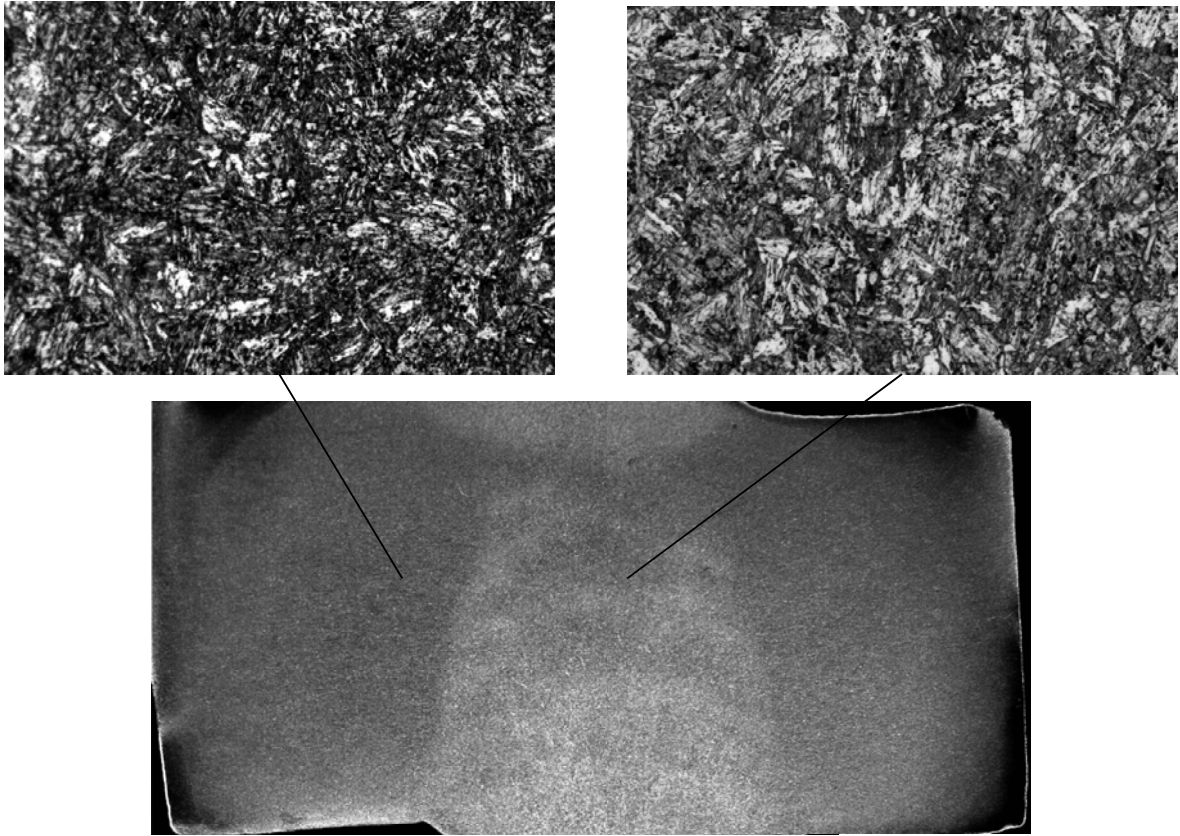


Рисунок 2. Микроструктура сварных образцов стали ВНС-63 после термической обработки (нормализация + отпуск+закалка + отпуск)

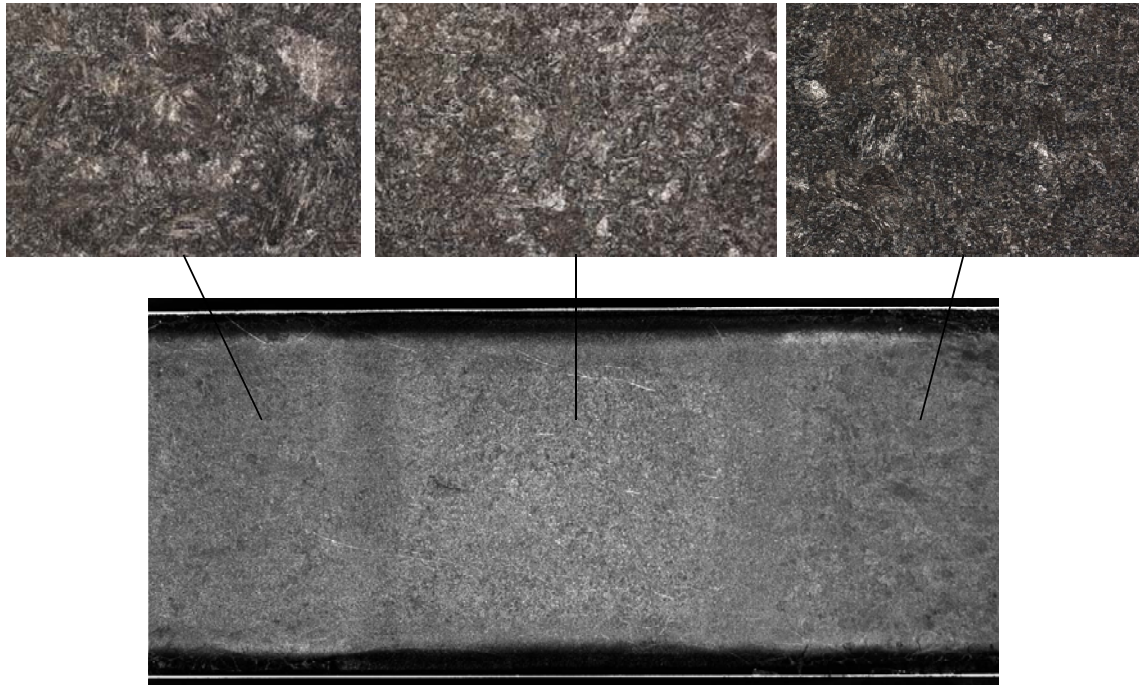


Рисунок 3. Микроструктура сердцевины после цементации и термической обработки сварных образцов стали ВНС-63 (нормализация + отпуск+цементация+отпуск)

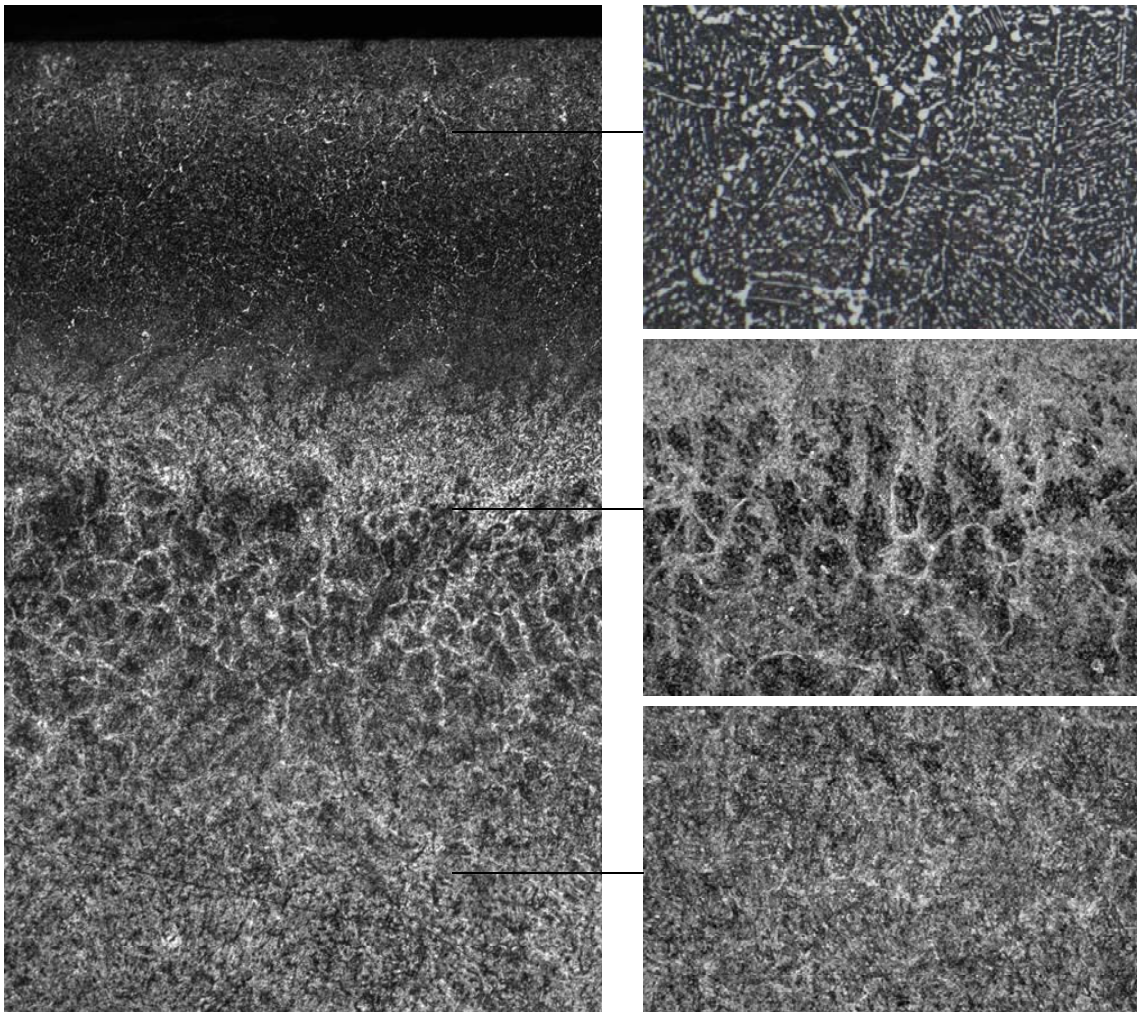


Рисунок 4. Микроструктура цементованного слоя сварных образцов стали ВНС-63

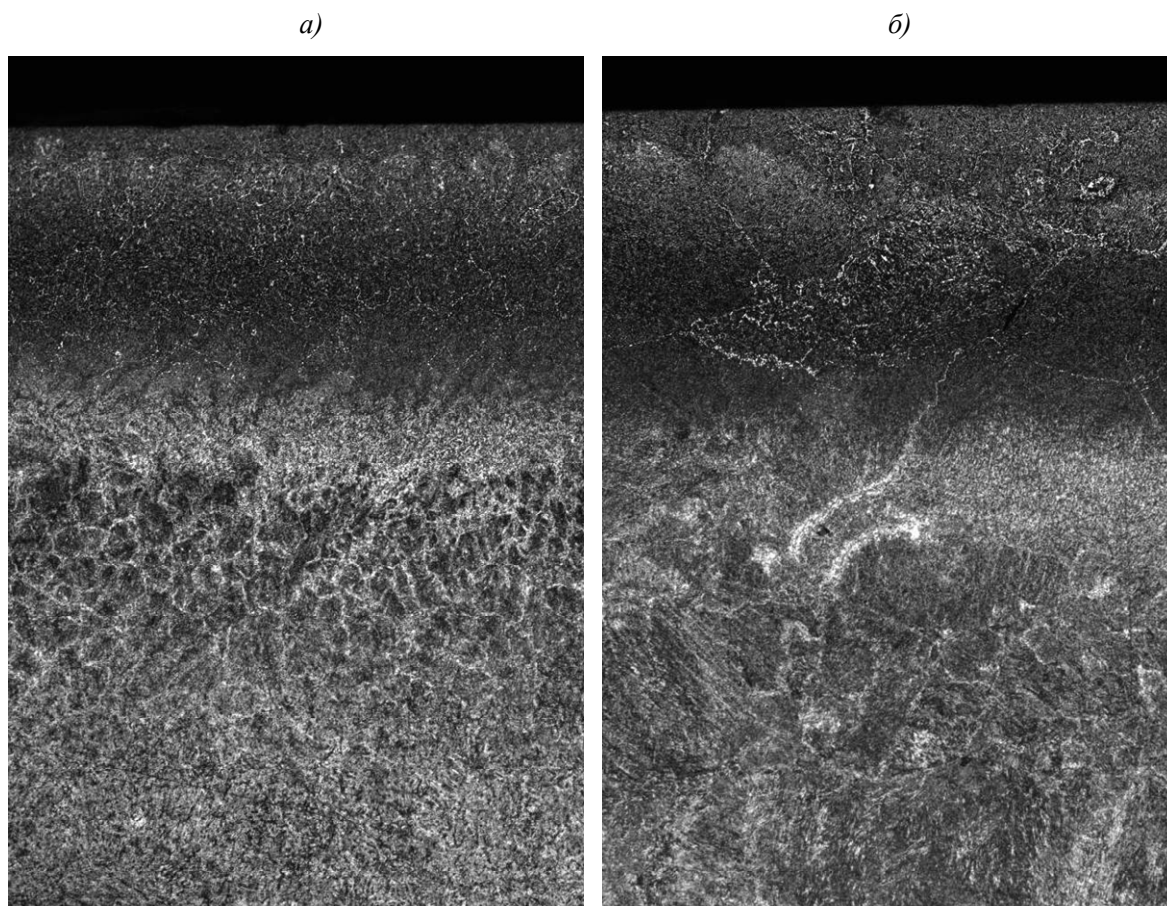


Рисунок 5. Микроструктура цементованного слоя сварных образцов стали ВНС-63:
a – сварной шов; *б* – зона термического влияния

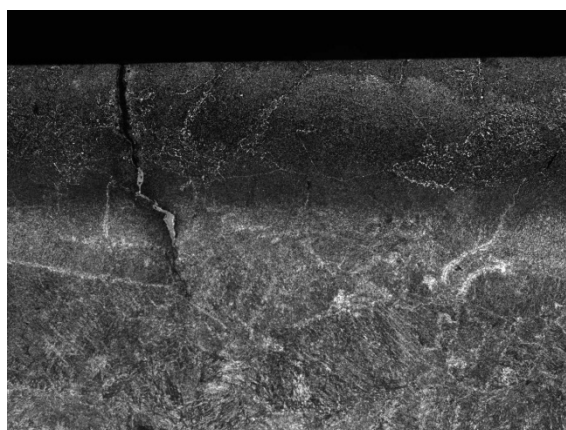


Рисунок 6. Микроструктура цементованного слоя сварных образцов стали ВНС-63 с трещиной

Выводы

1. Проведенные исследования партии сварных образцов после механических испытаний показали, что аргоно-дуговая сварка стали ВНС-63 с присадкой основного материала позволяет получить сварные соединения с прочностью 0,9–0,99 от прочности основного материала.

2. Исследования структуры сварных соединений из стали ВНС-63 показали, что микроструктура сварного шва отличается неоднородностью, в сварном шве зерно гораздо мельче, чем в околошовной зоне, термическая обработка существенно выравнивает структуру, но границы крупных зерен в зоне термического влияния сохраняются.

3. Для предотвращения трещинообразования в результате роста зерна (в процессе цементации) целесообразно защищать зону сварного шва гальваническим никелем или медью толщиной от 30 до 60 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
3. Лащенко Г.И. Тенденция развития технологий сварочного производства //Сварщик. 2011. №6. С. 6–11.
4. Миддельдорф К., Хофе Фон Д. Тенденции развития технологий соединения материалов //Автоматическая сварка. 2008. №11. С. 37–48.
5. Жуков А.А., Навоев А.П. Определение модуля упругости цементованного слоя //Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. №5. С. 37–40.
6. Лукин В.И., Вознесенская Н.М., Ковальчук В.Г., Голев Е.В., Саморуков М.Л. Сварка высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-72 //Сварочное производство. 2012. №10. С. 31–35.
7. Тонышева О.А., Вознесенская Н.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф. Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионностойкой стали переходного класса с повышенным содержанием азота //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 31–36.
8. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
9. Yang Z.G., Li S.X., Li Y.D., Liu Y.B., Hui W.J., Weng Y.Q. Relationship among fatigue life, inclusion size and hydrogen concentration for high-strength steel in the VHCF regime //Mater. Sci. and Eng. A. 2010. V. 527. №3. С. 559–564.
10. Kim Hye Sung, Kim Tae Guy, Chung Tai-Joo, Kim Hyun Soo, Hong Soon-Jik. Fatigue characteristics of high strength C70S6 and SMA40 steels //Mater. Sci. and Eng. A. 2010. V. 527. №12. С. 2813–2818.
11. Dimitriu R.C., Bhadeshia H.K.D.H. Fatigue crack growth rate model for metallic alloys //Mater. And Des. 2010. V. 31. №4. С. 2134–2139.
12. Фуруя Есиюки Оценка усталости сверхпрочных сталей и увеличение их срока службы //Mater. Sci. and Technol. 2011. V. 81. №8. С. 19–24.

13. Xiong Y., Hu X.X. The effect of microstructures on fatigue crack growth in Q345 steel welded joint //Fatigue and Fract. Eng. Mater. and Struct. 2010. V. 35. №6. С. 500–512.
14. Демьянушко И.В., Великанова Н.П. Влияние эксплуатационных факторов на долговечность роторных деталей турбин газотурбинных двигателей //Машиностроение и инженерное образование. 2011. №4. С. 51–55.
15. Контроль качества материалов и полуфабрикатов, используемых при изготовлении изделий авиационной, космической, оборонной техники и техники двойного применения, на предприятиях поставщиках. Общие требования по ГОСТ Р 52745–2007 //Справочник. Инженерный журнал. 2010. №10. С. 40–44.