УДК 620.193.2: 620.194.2

**О влиянии климатических факторов на коррозионную стойкость   
и сопротивление коррозионному растрескиванию высокопрочных сталей с высокой вязкостью разрушения**

**The influence of climatic factors on the corrosion resistance and   
stress corrosion cracking resistance of high-strength steels with   
high fracture toughness**

Белоус В.Я. 1; Варламова В.Е. 1; Курс М.Г. 1; Никитин Я.Ю. 1;   
Тонышева О.А. 1, к.т.н.

Belous Valentina Ykovlevna, Varlamovа Victoriya Evgenyevna, Course Maria Gennadevna, Nikitin Yanis Yuryevich, C.T.S. Tonyshevа Olga Aleksandrovna

nikitinyj@viam.ru

1*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)*

1*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» State research center of Russian Federation*

*(FSUE «VIAM» RF SRC)*

***Аннотация:***

В работе исследованы общая коррозионная стойкость и сопротивление коррозионному растрескиванию новых коррозионностойких азотосодержащих сталей ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75. Проведены коррозионные испытания образцов в натурных климатических условиях умеренно теплого климата приморской зоны, умеренного климата промышленной зоны и ускоренными методами в камере солевого тумана и камере тропического климата. Получены данные по удельному изменению массы образцов при испытаниях на общую коррозионную стойкость и время до разрушения образцов при испытаниях на стойкость к коррозионному растрескиванию.

***Ключевые слова:***

Коррозионная стойкость, коррозионное растрескивание, высокопрочные стали, болтовые соединения, сварные соединения.

***Summary:***

The paper investigated the general corrosion resistance and stress corrosion cracking resistance new corrosion-resistant nitrogen-containing steels VNS-73, VNS-74 and VNS-75. Corrosion tests were carried out in samples of natural climatic conditions of warm-temperate climate of the coastal zone, the temperate climate of the industrial zone and accelerated methods in the salt spray chamber and the tropical climate. Data on the specific change in mass of the sample under test to the general corrosion resistance and the time before the destruction of the samples in the tests for resistance to stress corrosion cracking.

***Keywords:***

The corrosion resistance, stress corrosion cracking, high strength steel, bolted joints, welded joints.

**Введение**

Согласно стратегическим направлениям развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года, одобренным на заседании Научно-технического совета Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации [1–3], одним из направлений является создание коррозионностойких свариваемых сталей с высокой вязкостью разрушения [4]. ФГУП «ВИАМ» успешно справляется с поставленной задачей. В последние годы нашим институтом разработаны коррозионностойкие азотосодержащие стали: ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75.

Сталь ВНС-73 (10Х13Н4К4М3С2А-Ш) мартенситного класса предназначена для изготовления сварных, не требующих обязательной термообработки после сварки, и несварных силовых деталей самолетов, длительно работающих при температурах от -70 до + 200°С [5]. В ВИАМе разработаны и полностью освоены технологии аргонно-дуговой (АрДЭС) и электроннолучевой сварки (ЭЛС) [6], а также сварка трением (СТ)

данной стали. Сталь ВНС-73 разработана взамен стали ВНС-2, обладает, по сравнению с последней, более высокой прочностью основного металла и сварных соединений: σвосн мет≥1370 МПа,   
σВсв=1245 МПа (термообработка + сварка АрДЭС с присадкой 08Х14Н7КВМ).

Экономнолегированная сталь ВНС-74 (05Х16Н5АБ) мартенситного класса с прочностью σв≥1400 МПа отличается тем, что содержит повышенное количество азота (более 0,10% масс.) и не имеет дорогостоящих элементов кобальта и молибдена; обладает высокой технологической пластичностью, в том числе в холодном состоянии, предназначена для изготовления крепежа, получаемого горячей или холодной высадкой, эксплуатирующегося при температурах от -70 до +200°С.

Сталь ВНС-75 (17Х13Н4К6САМ3ч) переходного класса предназначена для высоконагруженных деталей планера и шасси; благодаря подобранному фазовому составу, состоящему из мартенсита, 10–15% остаточного аустенита и без дельта-феррита, а также легированию редкоземельными металлами, снижающими содержание неметаллических включений, сталь ВНС-75 обладает высоким комплексом механических свойств: σв=1760 МПа, σ0,2=1320 МПа, КСV=80–90 Дж/см2 (образец с   
V-образным надрезом rн=0,25 мм), МЦУ на базе 2⋅105 циклов с концентратором напряжений Кt=2,2 σmax=730 МПа.

Помимо высокого комплекса механических характеристик данные стали должны обладать высокой коррозионной стойкостью и сопротивлением коррозионному растрескиванию (КР), т.к. предназначены для эксплуатации во всеклиматических условиях.

Целью настоящей работы являлось исследование влияние климатических факторов на общую коррозионной стойкость и сопротивление коррозионному растрескиванию сталей ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75.

**Объекты и методы исследования**

Исследования проводили на металле промышленной плавки, выплавленном в открытой печи с последующим электрошлаковым переплавом на ОАО «Металлургический завод «Электросталь»» (сталь ВНС-73 и ВНС-74) и металле, выплавленном на производственно-экспериментальной базе ФГУП «ВИАМ» (сталь ВНС-75).

Для оценки общей коррозионной стойкости были изготовлены:

– из стали ВНС-73 образцы-шайбы диаметром 32 мм, толщиной 2 мм с двумя видами обработки поверхности: шлифование и виброгалтовка;

– из стали ВНС-74 образцы-шайбы диаметром 27 мм, толщиной 3 мм с двумя видами обработки поверхности: шлифование и пескоструйная обработка;

– из стали ВНС-75 образцы размером 24х24х2,5 мм с двумя видами обработки поверхности: шлифование и пескоструйная обработка.

Для оценки склонности к КР были изготовлены:

– из стали ВНС-73 образцы-пластины основного металла размером 98×15×2 мм с пескоструйной обработкой поверхности и образцы-пластины из сварных соединений, выполненных аргонно-дуговой электросваркой (АрДЭС) с присадкой 08Х14Н7КВМ, электроннолучевой сваркой (ЭЛС) и сваркой трением (СТ) также с пескоструйной обработкой поверхности;

– из стали ВНС-74 образцы-пластины основного металла размером 98×15×2 мм с пескоструйной обработкой поверхности, а также опытная партия болтов М6 и М8 горячей высадки с двумя видами обработки поверхности головки и призонной части: шлифование и пескоструйная обработка;

– из стали ВНС-75 образцы-пластины основного металла размером 98х15х2 мм с пескоструйной обработкой поверхности.

Испытания образцов на склонность к КР проводили в соответствии с ОСТ 1 90212 при постоянной деформации изгибом. Величины приложенных напряжений составляли 980, 880 и 780 МПа. Испытания болтов на склонность к КР проводили в соответствии с методическими материалом, разработанном в ВИАМе: «Методика испытания болтовых соединений из коррозионностойких сталей на сопротивление коррозионному растрескиванию». Болты испытывали без перекоса и с перекосом до 8 градусов. Величины приложенных напряжений составляли 0,7 от Мразр (63 Н/м) и 0,5 от Мразр (45 Н/м), где Мразр – величина разрушающего момента.

Для исследования влияния климатических факторов на общую коррозионную стойкость были проведены коррозионные испытания образцов в натурных условиях умеренно теплого климата приморской зоны Геленджикского Центра Климатических Испытаний (ГЦКИ), натурных условиях умеренного климата промышленной зоны Московского Центра Климатических Испытаний (МЦКИ) в соответствии с ГОСТ 9.909 и коррозионные испытания ускоренными методами в камере тропического климата (КТК) в соответствии со стандартом, разработанном в ВИАМе, и камере солевого тумана (КСТ) в соответствии с ГОСТ 9.308 (метод 1). Для исследования влияния климатических факторов на сопротивление КР образцы испытывали в ГЦКИ, МЦКИ и КСТ. Болты испытывали в ГЦКИ и КСТ. Длительность коррозионных испытаний составила 12 месяцев.

Оценку общей коррозионной стойкости сталей проводили в соответствии с ГОСТ 9.908 по потере массы на единицу площади. Оценку склонности сталей к КР проводили в соответствии с ОСТ 1 90212 по времени до начала растрескивания.

**Результаты исследования**

Данные по удельной потере массы образцов из сталей ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75 после коррозионных испытаний в ГЦКИ, МЦКИ, КТК и КСТ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Изменение удельной массы образцов из сталей ВНС-73, ВНС-74, ВНС-75 после коррозионных испытаний в различных условиях

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Вид обработки поверхности | Изменение удельной массы образцов (г/м2) после экспозиции в | | | | | |
| ГЦКИ | | МЦКИ | | КТК | КСТ |
| жалюзийная будка | навес | открытый стенд | жалюзийная будка |
| Сталь  ВНС-73 | шлифование |  |  |  | ‒ | ‒ |  |
| виброгалтовка |  |  |  |  |
| Сталь  ВНС-74 | шлифование |  | ‒ |  | ‒ |  |  |
| пескоструйная обработка |  |  |  |  |
| Сталь  ВНС-75 | шлифование |  | ‒ | ‒ |  |  |  |
| пескоструйная обработка | ‒ | ‒ | ‒ |  |

\*Примечание: в числители приведены значения после 6 месяцев испытаний, в знаменателе – после   
12 месяцев испытаний

Анализируя данные таблицы 1 можно сказать, что для стали ВНС-73 наименьшие потери массы образцов наблюдаются при испытаниях в МЦКИ. Различная обработка поверхности образцов из стали ВНС-73 не оказывает значительного влияния на общую коррозионную стойкость при испытаниях в натурных климатических условиях, однако при испытаниях в КСТ потери массы образцов со шлифованной поверхностью большем на 0,8 г/м2, чем на образцах с виброгалтованной поверхностью.

Наименьшие потери массы образцов из стали ВНС-74, аналогично стали ВНС-73, наблюдаются при испытаниях в МЦКИ. Потери массы образцов при испытаниях в ГЦКИ превышают значения потерь массы образцов, испытанных в КСТ. Пескоструйная обработка поверхности образцов из стали ВНС-74 ухудшает общую коррозионную стойкость в сравнении со шлифованной поверхностью.

Изменение массы образцов из стали ВНС-75 после 6 месяцев экспозиции МЦКИ и КТК не зафиксировано. Также как и для стали   
ВНС-74, пескоструйная обработка поверхности образцов из стали ВНС-75 ухудшает общую коррозионную стойкость и приводит к увеличению убыли массы.

Данные по склонности сталей ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75 к коррозионному растрескиванию приведены в таблицах 2–4. Основной металл указанных сталей за 12 месяцев испытаний не проявил склонности к КР независимо от условий экспозиции и приложенных напряжений. Испытанные в КСТ сварные соединения стали ВНС-73, выполненные АрДЭС и ЭЛС, не проявили склонности к КР при напряжении 980 МПа, а сварные соединения, выполненные СТ - при напряжениях 880 и 780 МПа. На болтовых соединениях из стали ВНС-74, прошедших экспозицию в ГЦКИ и КСТ, также отмечается отсутствие трещин. Стойкость болтовых соединений не зависит от наличия перекоса и вида обработки поверхности головки и призонной части.

Таблица 2

Склонность сталей ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75 к КР при испытаниях   
в различных условиях

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Величина приложенных напряжений,  МПа | Время до разрушения (мес.) при экспозиции в | | | |
| ГЦКИ,  жалюзийная будка | МЦКИ | | КСТ |
| открытый стенд | жалюзийная будка |
| Сталь  ВНС-73 | 980 | За 12 месяцев испытаний разрушения (трещины) не обнаружены | | ‒ | За 12 месяцев испытаний разрушения (трещины) не обнаружены |
| 880 |
| 780 |
| Сталь  ВНС-74 | 980 | Аналогично | | ‒ | Аналогично |
| 880 |
| 780 |
| Сталь  ВНС-75 | 980 | Аналогично | ‒ | За 12 месяцев испытаний разрушения (трещины) не обнаружены | Аналогично |
| 880 |
| 780 |

Таблица 3

Склонность сварных соединений из стали ВНС-73 к КР при испытаниях в КСТ

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Вид сварки | Термическая обработка после сварки | Величина приложенных напряжений,  МПа | Условия коррози-онных испытаний | Время до разруше-ния,  мес. |
| Сталь  ВНС-73 | АрДЭС  с присадкой 08Х14Н7КВМ | Без термообработки | 980 | КСТ | За 12 месяцев испытаний разрушения (трещины) не обнаружены |
| ЭЛС | 980 |
| СТ | 880 |
| 780 |

Таблица 4

Склонность болтовых соединения из стали ВНС-74 к КР при испытаниях   
в ГЦКИ и КСТ

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Вид болтов | Вид обработки поверхности головки и призонной части | Величина приложенных напряжений,  МПа | Наличие перекоса | Время до разрушения (мес.) при экспозиции в | |
| ГЦКИ,  жалюзийная будка | КСТ |
| Сталь  ВНС-74 | М8 | шлифование | 0,7 от Мразр | без перекоса | ‒ | За 12 месяцев испытаний разрушения (трещины) не обнаружены |
| 0,5 от Мразр |
| пескоструйная обработка | 0,7 от Мразр | За 12 месяцев испытаний разрушения (трещины) не обнаружены | ‒ |
| 0,5 от Мразр |
| М6 | шлифование | 0,7 от Мразр | без перекоса | ‒ | Аналогично |
| перекос 8° |
| 0,5 от Мразр | без перекоса |
| перекос 8° |
| пескоструйная обработка | 0,7 от Мразр | Без перекоса | ‒ | Аналогично |
| перекос 8° |
| 0,5 от Мразр | перекос 8° |

**Выводы**

1. Повышенное содержание в атмосфере хлор-ионов при испытаниях в камере солевого тумана и натурных условиях умеренно теплого климата приморской зоны приводит к значительному снижению общей коррозионной стойкости сталей ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75. В натурных условиях умеренного климата промышленной зоны указанные стали показывают более высокую общую коррозионную стойкость так, например, за 6 месяцев испытаний потери массы на образцах со шлифованной поверхностью не зафиксированы. Испытания в камере тропического климата не оказывают влияния на общую коррозионную стойкость стали ВНС-75, однако приводят к значительным потерям массы на образцах из стали ВНС-74;

2. Различные условия коррозионных испытаний не влияют на склонность основного металла сталей ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75 к КР при напряжениях 980, 880 и 780 МПа. За 12 месяцев испытаний случаев КР обнаружено не было. Сварные соединения из стали ВНС-73, выполненные АрДЭС с присадкой 08Х14Н7КВМ, ЭЛС и СТ без последующей термической обработки, обладают высокой стойкостью к КР при испытаниях в камере солевого тумана. Случаев КР также не было обнаружено. Опытная партия болтов М6 и М8 горячей высадки, изготовленная из стали ВНС-74, за 12 месяцев испытаний в камере солевого тумана и натурных условиях умеренно теплого климата приморской зоны не проявила склонность к КР;

3. При эксплуатации деталей из сталей ВНС-73, ВНС-74 и ВНС-75 в составе изделий всеклиматического исполнения для повышения общей коррозионной рекомендуется применять дополнительную защиту, например, лакокрасочные покрытия.

Литература

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. - 2013. - №10-11. - С. 23–32.

2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. - 2012. - №S. - С. 7–17.

3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. - 2012. - №3. - С. 10–15.

4. Тонышева О.А., Вознесенская Н.М. Перспективные высокопрочные коррозионностойкие стали, легированные азотом (сравнительный анализ) // Авиационные материалы и технологии. - 2014. - №3. - С. 27–32.

5. Белоус В.Я., Варламова В.Е., Никитин Я.Ю., Вознесенская Н.М., Тонышева О.А. Исследование влияния климатических факторов на механические свойства и коррозионную стойкость высокопрочной стали ВНС-73 // Сталь. - 2015. - №1. - С. 80–83.

6. Лукин В. И., Ковальчук В. Г., Голев Е. В., Ходакова Е. А. Cварка высокопрочных коррозионностойких сталей // Труды ВИАМ. - 2015. - №5. - Ст. 04 (viam-works.ru).