

УДК 669.14.018.8

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-27-32

О.А. Тоньшева¹, Н.М. Вознесенская¹**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННЫЕ АЗОТОМ (СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ)***

Рассмотрены перспективные высокопрочные коррозионностойкие стали, легированные азотом, в том числе с повышенным его содержанием, разработанные за последние годы во ФГУП «ВИАМ», а также совместно с ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова. Описаны механические, коррозионные и технологические свойства этих сталей и их сварных соединений, а также способы их производства. Раскрыты принципы легирования коррозионностойких азотсодержащих сталей; показана возможность повышения их комплекса механических свойств путем применения высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО).

Ключевые слова: коррозионностойкие стали, азот, свойства.

The article considers perspective high-strength corrosion-resistant steels alloyed with nitrogen including increased content of nitrogen steels which have developed at FSUE «All-Russian scientific research institute of aviation materials» and also in conjunction with the institute of Metallurgy and material science in recent years. It is described mechanical and corrosion properties of these steels and their welds and also methods of their production. It is revealed alloying principles of corrosion-resistant nitrogen steels and shown the possibility of increasing of their properties by means of high-temperature thermo-mechanical processing.

Keywords: corrosion-resistant steels, nitrogen, properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

* В работе принимал участие А.Б. Шалькевич.

Введение

Планер современных самолетов – сложная конструкция, для изготовления силовых элементов которого требуются высокотехнологичные, хорошо свариваемые стали, обладающие высокими прочностью и надежностью.

Высокопрочные коррозионностойкие стали применяются для изготовления некоторых деталей планера самолетов различного назначения как наиболее удовлетворяющие требуемым параметрам материалы. В качестве высокопрочных коррозионностойких сталей для силовых деталей планера и шасси широко используются стали ВНС-5 с $\sigma_{\text{в}} \approx 1500$ МПа, ВНС-2 и ЭП817 с $\sigma_{\text{в}} \geq 1225$ МПа.

Однако достижение нового уровня развития авиации возможно только при обеспечении этой отрасли новыми материалами [1–3]. Предъявляемые конструкторами требования к снижению массы, габаритов деталей и узлов приводят к изысканию путей повышения прочности коррозионных сталей при обеспечении высоких характеристик надежности в процессе эксплуатации.

С целью повышения ресурса работы изделий при эксплуатации, а также изыскания способов удешевления их изготовления поставлена задача создания сталей с уровнем свойств, превышающем уровень свойств известных серийно применяемых сталей.

Перспективными являются коррозионностойкие хромоникелевые стали мартенситного и пере-

ходного классов, легированные совместно углеродом и азотом и обладающие лучшим сочетанием механических и коррозионных свойств по сравнению с аналогичными углеродсодержащими сталями. Азот, как и любой элемент внедрения, повышает прочностные свойства материалов, однако азотсодержащие стали обладают довольно высокими пластическими свойствами, неприемлемыми для высокопрочного материала [4].

В настоящее время проводятся исследования коррозионностойких азотсодержащих хромоникелевых сталей аустенитного класса [5–9]. По сравнению с безазотистыми сталями азотсодержащие стали обладают повышенной прочностью (на 25–35%) при сохранении высоких значений пластичности ($\delta \geq 50\%$, $\psi \geq 70\%$) [10].

Область применения аустенитных азотсодержащих сталей достаточно широка – это и транспортное машиностроение, и судостроение, и медицина, и химическая промышленность.

Положительный эффект от азота как легирующего элемента заключается в том, что он приводит к снижению энергии дефектов упаковки, расширяя область существования аустенита, сужает область существования дельта-феррита, охрупчивающего сталь, а также позволяет уменьшить количество элементов, стабилизирующих аустенит (углерода и никеля). Кроме того, азот является наиболее дешевым элементом, применяющимся для легирования сталей [11].

Таблица 1

Сравнительные механические свойства высокопрочных коррозионностойких сталей переходного класса (средние значения)

Свойства	Значения свойств для стали (содержание углерода/азота, %)		
	ВНС-65 (0,18–0,20)/(0,07–0,09)	ВНС-5 (0,11–0,16)/(0,05–0,10)	АМ-355 (США)
σ_b , МПа	1700	1550	1550
$\sigma_{0,2}$, МПа	1300	1200	1250
δ_5 , %	15–20	18	12
ψ , %	55–60	60	38
КСУ, Дж/см ² ($r_n=0,25$ мм)	65	90	23
K_{1c} , МПа	145	175	86
МЦУ ($N=2 \cdot 10^5$ цикл): σ_{max} , МПа, при K_t :			
1,035	970	–	–
1,7	765	–	–
2,2	600	450	–
Коррозия под напряжением при $\sigma=980$ МПа (КСТ-35): время до разрушения $\tau_{разр}$, год	>1	>1	–

Таблица 2

Механические свойства высокопрочных коррозионностойких сталей мартенситного класса ВНС-73 и ЭП817

Свойства	Значения свойств для стали (содержание углерода/азота, %)	
	ВНС-73 (0,08–0,12)/(0,05–0,10)	ЭП817 (0,05–0,08)/(–)
σ_b , МПа	≥ 1375	≥ 1225
$\sigma_{0,2}$, МПа	1200	930
δ_5 , %	15	15
ψ , %	55	55
КСТ, Дж/см ²	65	70
K_{1c} , МПа	145	175
МЦУ: σ_{max} , МПа (при $N=2 \cdot 10^5$ цикл; $K_t=2,2$)	608	490
$\sigma_{в.св}^*$, МПа	1250	1078
МЦУ: $N_{св}^*$ цикл (при $\sigma_{max}=735$ МПа)	$>200 \cdot 10^3$	$(50-80) \cdot 10^3$
Коррозия под напряжением* при $\sigma=980$ МПа (КСТ-35): $\tau_{разр.св}$, мес	>6 (без разрушения)	>6 (без разрушения)

*Сварные соединения, выполненные сваркой АрДЭС с присадкой 08X14N7KBM-ВИ («КВМ»), без последующей упрочняющей термообработки.

В ВИАМ проведены работы по созданию ряда высокопрочных сталей, содержащих азот в качестве легирующего элемента.

Высокопрочная коррозионностойкая азотсодержащая свариваемая сталь ВНС-65 (18X13N4K4C2AM3) [12] относится к сталям переходного класса, обладает прочностью 1700 МПа и одновременно – высокими трещиностойкостью ($K_{Ic}=145$ МПа $\sqrt{м}$) и сопротивлением усталости ($\sigma_{max}=600$ МПа, при $N=2\cdot 10^5$ циклов; $K_f=2,2$). Получить такие характеристики удалось благодаря легированию углеродом и азотом в заданном суммарном процентном соотношении, а также кремнием и кобальтом. Химический состав стали ВНС-65 подобран с таким расчетом, чтобы после упрочняющей термообработки структура состояла на 80–85% из мартенсита, 20–15% – остаточного аустенита и без дельта-феррита. Высокий комплекс механических свойств позволяет использовать сталь ВНС-65 для изготовления ответственных тяжело нагруженных деталей планера и шасси.

В настоящее время сталь ВНС-65 применяется при производстве силовых деталей в изделии пятого поколения Т-50 разработки ОАО «ОКБ Сухого». Сталь ВНС-65 не имеет аналогов как в России, так и за рубежом (табл. 1).

Термическая обработка сварных стальных соединений способствует выравниванию структуры, характеризующейся после сварки разнотекстурностью [13].

В ряде случаев проведение термической обработки сложных тонколистовых крупногабаритных сварных конструкций с большим перепадом сечения весьма проблематично. Для решения этой проблемы создана высокопрочная коррозионностойкая сталь ВНС-73 (10X13N4K4M3C2A) [14], не требующая обязательной термической обработки после сварки.

Химический состав стали ВНС-73 разработан на базе химического состава широко применяемой стали ЭП817 (06X14N6Д2МБТ) аналогичного назначения. Дополнительное легирование этой стали азотом, кремнием и кобальтом позволило получить материал с более высокими характеристиками прочности и надежности (скорость роста трещины усталости и сопротивление малоциклового усталости) как сварных, так и несварных деталей (табл. 2). Сталь ВНС-73 предназначена для изготовления силовых деталей самолетов, длительно работающих при температурах от -70 до +200°C во всеклиматических условиях. Сталь ВНС-73 хорошо сваривается аргонодуговой сваркой (АрДЭС) с присадкой и без присадки, после сварки не требует обязательной термообработки.

В вышеперечисленных сталях мартенситного и аустенито-мартенситного классов содержание азота, способного растворяться в твердом растворе, не превышает 0,10%. Увеличение его количе-

ства сверх указанной цифры позволило разработать стали с новой системой легирования Cr–Ni–N без дорогих и дефицитных элементов – кобальта и молибдена. По физико-механическим свойствам такие стали не уступают сталям традиционной системы легирования.

Одной из сталей с повышенным содержанием азота (0,12–0,13%) является высокопрочная коррозионностойкая экономнолегированная сталь ВНС-74 (05X16N5AB) мартенситного класса [15], разработанная во ФГУП «ВИАМ» совместно с ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова для изготовления крепежных деталей.

В машиностроительной отрасли промышленности для изготовления крепежа (болтов, гаек и т. д.), в том числе сложной формы и малых размеров, используется метод холодной высадки, позволяющий изготавливать изделия, практически не требующие последующей механической обработки. Данный метод обеспечивает деталям качество, надежность и прочность благодаря сохранению правильного расположения волокон в деталях [16]. Кроме того, отсутствие нагрева под высадку позволяет получить более точные размеры деталей и с более чистой поверхностью.

Процесс холодной высадки зависит от многих факторов, основными из которых являются пластичность материала, подвергаемого деформации, химический состав, механические свойства, величина зерна [17].

В настоящее время методом холодной высадки можно получить крепеж из высокопрочной коррозионностойкой стали СН-2А (07X16N6) с $\sigma_b=1177$ МПа и $\tau_{cp}=686$ МПа. Сталь ВНС-74, разработанная для изготовления высадного крепежа, получаемого холодной деформацией, обладает более высокими прочностными характеристиками (табл. 3) и является более технологичной.

Исследование механических свойств крепежных деталей, изготовленных на ОАО «Нормаль» из стали ВНС-74, показало, что при высокой прочности детали обладают высокой пластичностью и не чувствительны к перекошу 6 град. Сталь ВНС-74 рекомендуется для эксплуатации при температурах от -70 до +200°C во всеклиматических условиях.

Разработана коррозионностойкая экономнолегированная сталь ВНС-72 (15X14N4ГАМ) [18], содержащая до 0,14–0,15% азота, которая отличается помимо высоких прочностных параметров ($\sigma_b=1750$ МПа) высокими пластичностью, надежностью и трещиностойкостью [19]. Сталь принадлежит к аустенито-мартенситному (переходному) классу, упрочняется за счет суммарного содержания азота и углерода ~0,30%.

Несмотря на высокое содержание азота, сталь ВНС-72 хорошо сваривается аргонодуговой сваркой с присадкой, имеет удовлетворительные значения ударной вязкости как при комнатной, так и при отрицательных температурах в состоянии «сварка+термообработка» [20]:

Таблица 3

Механические свойства экономнолегированной стали ВНС-74 и стали СН-2А

Свойства	Значения свойств для стали (содержание углерода/азота, %)	
	ВНС-74 (0,03–0,07)/(0,12–0,14)	СН-2А (0,07)/(-)
σ_b , МПа	1400	1177
$\sigma_{0,2}$, МПа	1200	880
$\tau_{ср}$, МПа	950	686
σ_{-1} , МПа ($N=10^7$ цикл)	730	540
Разрушающая нагрузка, Н: при разрыве при срезе	53900 46305	36554 33722

Таблица 4

Механические свойства сталей ВНС-72, ВНС-5 и ВНС-43

Свойства	Значения свойств для стали (содержание углерода/азота, %)		
	ВНС-72 (0,14–0,16)/(0,14–0,16)	ВНС-5 (0,11–0,16)/(0,05–0,10)	ВНС-43 (0,16–0,21)/(0,04–0,09)
σ_b , МПа	1750	1470	1570
$\sigma_{0,2}$, МПа	1350	1200	1225
KCV , Дж/см ² ($r_n=0,25$ мм)	80	90	70
СРТУ: dI/dN , мм/цикл (при $\Delta K=31$ МПа \sqrt{M})	0,22	0,30	0,25
K_{Ic} , МПа \sqrt{M}	145	175	130
МЦУ: σ_{max} , МПа (при $N=2 \cdot 10^5$ цикл; $K_f=2,2$)	700	400	500
$\sigma_{b,св}$, МПа (ЭЛС+термообработка)	1600	1400	1600

Таблица 5

Сравнительные механические свойства азотсодержащей стали ВНС-53ПД и сталей 12Х18Н10Т и ВНС-2 (для труб)

Свойства	Значения свойств для стали (содержание углерода/азота, %)		
	ВНС53-ПД ($\leq 0,08/0,5$)	12Х18Н10Т	ВНС-2
σ_b , МПа	980	600	880
$\sigma_{0,2}$, МПа	780	280	686
σ_{-1} , МПа	400	220	320
δ_5 , %	20	40	10

– присадка 08Х14Н7КВМ-ВИ –
 $KCV_{шов}^{+20^\circ} = 76,5$ Дж/см², $KCV_{шов}^{-70^\circ} = 74$ Дж/см²,

$KCV_{линия\ сплавления}^{+20^\circ} = 95$ Дж/см²;

– присадка ВНС-72 –
 $KCV_{шов}^{+20^\circ} = 60$ Дж/см², $KCV_{шов}^{-70^\circ} = 50$ Дж/см²,

$KCV_{линия\ сплавления}^{+20^\circ} = 90$ Дж/см².

Сталь ВНС-72 предназначена для изготовления силовых деталей планера, шасси, крепежа взамен сталей серийного производства ВНС-5 и ВНС-43. Механические свойства стали ВНС-72, а

также серийных сталей ВНС-5 и ВНС-43 представлены в табл. 4.

Сталь ВНС-72 хорошо деформируется в горячем состоянии со степенью обжатия до 80% без образования трещин, что позволяет использовать метод высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) для повышения механических и коррозионных свойств благодаря формированию фрагментированной субструктуры. При использовании ВТМО сталь при деформации 50–70% не чувствительна к коррозионному растрескиванию в камере солевого тумана (КСТ-35) – при приложенных напряжениях 980, 880 и 780 МПа образцы выдерживают испытания без разрушения >1 года [21]. Фрагментированная суб-

структура способствует также повышению сопротивления усталостному разрушению [22].

Высокопрочные коррозионностойкие стали, упрочняемые углеродом и азотом, выплавляются, как правило, в открытых индукционных или дуговых печах с последующим электрошлаковым переплавом (ЭШП). Выплавка в вакууме, а также последующие вакуумно-дуговой или электронно-лучевой переплавы резко снижают содержание азота в стали [23, 24].

В сталях мартенситного или аустенито-мартенситного класса растворимость азота без применения специальных методов выплавки составляет ~0,10%. Однако при легировании сталей элементами, увеличивающими растворимость азота (Сг, Мп и др.), при выплавке на оптимальный фазовый состав для получения требуемых механических свойств растворимость азота повышается – до 0,15% в сталях переходного класса (сталь ВНС-72) и до 0,13% в сталях мартенситного класса (сталь ВНС-74) с получением плотных слитков.

Структура аустенитных сталей позволяет легировать их большим количеством азота вследствие высокой растворимости его атомов в решетке γ -Fe. Кроме того, наличие хрома >12% в коррозионностойких сталях способствует повышению растворимости азота.

Высокое давление, несжимаемость гидрожидкости, колебание давления – все это предъявляет повышенные требования к трубопроводам. В связи с этим материал для изготовления трубопроводов должен обладать прочностью и жесткостью, высокой технологичностью, чтобы была возможность легко производить необходимые изгибы детали, надежно противостоять действию вибраций (переменным нагрузкам). Необходимость снижения массы деталей и повышения характеристик прочности и надежности обусловила разработку нового материала, имеющего преимущество перед сталями аналогичного назначения.

В авиационных трубопроводах применяли аустенитную сталь 12X18H10T с пределом прочности ≥ 550 МПа, а также сталь ВНС-2 мартенситного класса с пределом прочности ≥ 880 МПа. Сталь ВНС-2 после упрочняющей термообработки состоит из мартенсита, остаточного аустенита и фаз, выделившихся при старении. Вследствие высокой твердости эти фазы, а также присутствующие в стали неметаллические включения являются концентраторами напряжений, которые в тонкостенных трубах могут приводить к их преждевременному разрушению.

Высокопрочная коррозионностойкая аустенитная сталь ВНС-53 (08X21Г11АН6) отличается высоким содержанием азота (до 0,5–0,6%) и обладает прочностью ≥ 980 МПа. Данная сталь разработана как материал для тонкостенных трубопроводов гидросистем высокого давления летательных аппаратов, работающих во всеклиматических условиях в контакте с авиационными гидрожидкостями при температурах от -70 до +300°C.

Сталь ВНС-53 помимо прочностных характеристик превосходит стали-аналоги по показателям выносливости при сохранении хорошей пластичности и технологичности (табл. 5).

Указанный в табл. 5 комплекс механических свойств стали ВНС-53 достигается благодаря упрочнению аустенитной матрицы легированием одновременно углеродом и азотом при заданной сумме этих элементов. В структуре стали отсутствует дельта-феррит, образование которого облегчено при высоком содержании хрома. Уменьшение количества дельта-феррита возможно путем повышения содержания никеля [25]. В стали ВНС-53 выделение дельта-феррита подавляется азотом как аустенитообразующим элементом, который частично заменяет никель.

Заключение

Азотсодержащие коррозионностойкие хромоникелевые стали являются перспективными материалами для авиационной техники, обладающими лучшим сочетанием механических и коррозионных свойств по сравнению с углеродсодержащими сталями.

Упрочнение сталей с азотом в количестве до 0,10% достигается благодаря углероду, азоту, а также другим элементам, таким как кремний, кобальт и молибден (стали ВНС-73, ВНС-65).

При содержании в стали азота >0,10% помимо высоких прочностных характеристик сталь обладает высокими значениями пластичности и вязкости и не требует введения дорогих легирующих элементов (Co, Mo).

Выплавка азотсодержащих высокопрочных коррозионностойких сталей проводится в открытой индукционной или дуговой печи с последующим ЭШП.

Стали с повышенным содержанием азота (>0,10%) требуют специального метода выплавки в печах с избыточным давлением или рационального расчета химического и фазового состава, способствующего удержанию азота в твердом растворе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ. Направление главного удара //Наука и жизнь. 2012. №6. С. 14–19.
4. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Новая высокопрочная экономнолегированная азотсодержащая сталь повышенной надежности //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 84–88.
5. Березовская В.В., Костина М.В., Блинов Е.В., Боброва Б.Е., Банных И.О. Влияние термической обработки на структуру высокоазотистых аустенитных коррозионностойких сталей 04X22AG17H8M2Ф и 07X20AG9H8MФ //Металлы. 2009. №2. С. 61–68.
6. Блинов Е.В., Хадыев М.С. Исследование структуры и механических свойств коррозионностойких высокоазотистых сталей 04X22AG15H8M2Ф и 05X19AG10H7MBФ //Металлы. 2009. №2. С. 93–99.
7. Березовская В.В., Банных О.А., Костина М.В., Блинов Е.В., Шестаков А.И., Саврай Р.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства высокоазотистой аустенитной коррозионностойкой стали 03X20AG11H7M2 //Металлы. 2010. №2. С. 34–44.
8. Устиновщиков Ю.И., Блинов В.М. Структурные и фазовые превращения высокоазотистой стали 05X20AG10H3MФ при термическом воздействии //Металлы. 2012. №1. С. 72–79.
9. Блинов Е.В., Терентьев В.Ф., Просвирнин Д.В., Блинов В.М., Бакунова Н.В. Циклическая прочность коррозионностойкой аустенитной азотсодержащей стали 05X22AG15H8MФ в условиях повторного растяжения //Металлы. 2012. №1. С. 80–87.
10. Науменко В.В., Шлямнев А.П., Филиппов Г.А. Азот в аустенитных нержавеющих сталях различных систем легирования //Металлург. 2011. №6. С. 46–53.
11. Королев М.Л. Азот как легирующий элемент стали. М.: Металлургиздат. 1961. С. 4.
12. Высокопрочная коррозионностойкая сталь аустенито-мартенситного класса: пат. 2164546 Рос. Федерация; опубл. 27.03.2001.
13. Лукин В.И., Банас И.П., Ковальчук В.Г., Голев Е.В. Аргоно-дуговая сварка высокопрочной цементуемой стали ВНС-63 //Труды ВИАМ. 2013. №8. Ст. 01 (viam-works.ru).
14. Высокопрочная коррозионностойкая сталь мартенситного класса и изделие, выполненное из нее: пат. 2291912 Рос. Федерация; опубл. 10.11.2005.
15. Высокопрочная коррозионностойкая сталь: пат. 2318068 Рос. Федерация; опубл. 21.11.2005.
16. Мокринский В.И. Производство болтов холодной объемной штамповкой. М.: Металлургия. 1978. 71 с.
17. Мисоужников В.М., Гринберг М.Я. Технология холодной высадки металла. М.: Машгиз. 1951. 310 с.
18. Высокопрочная коррозионностойкая сталь и изделие, выполненное из нее: пат. 2214474 Рос. Федерация; опубл. 20.10.2003.
19. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Исследование новой высокопрочной экономнолегированной азотсодержащей стали повышенной надежности //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. №SP2. С. 17–20.
20. 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.
21. Тоньшева 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.
22. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Плешанов В.С., Клименов В.А., Иванов Ю.Ф., Почивалов Ю.И., Кибиткин В.В., Напрушкин А.А., Нехорошков О.Н., Лукин В.И., Сапожников С.В. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 //Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. №2. С. 85–96.
23. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостреющей стали ВКС-180 //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
24. Щербаков А.И., Мосолов А.Н., Калицев В.А. Восстановление технологии получения бериллийсодержащей стали ВНС-32-ВИ //Труды ВИАМ. 2014. №5. Ст. 01 (viam-works.ru).
25. Разуваев Е.И., Капитаненко Д.В. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства аустенитных сталей //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 01 (viam-works.ru).