

Таблица 3

**Механические свойства стали ВКС-180-ИД после нагрева
при 400°C в течение 100 ч**

Свойства		Значения свойств	
		в исходном состоянии	после нагрева при 400°C, 1000 ч
$\sigma_{0,2}$, МПа		1730	1790
σ_B , МПа		1770	1810
ψ , %		60	58
KCU , Дж/см ²	+20°C	69	68
	-70°C	63	54

Проведенными исследованиями также установлено, что нагревы при 400°C в течение 1000 ч, приводящие к незначительному росту прочности, не ухудшают пластичность (ψ) и вязкость разрушения (KCU) стали. Свойства стали ВКС-180-ИД в исходном состоянии и после длительного нагрева приведены в табл. 3.

Исследование сопротивления стали ВКС-180-ИД коррозионному растрескиванию проводилось в жестких условиях камеры КСТ-35 (разбрызгивание 5%-ного раствора NaCl при 35°C) на гладких шлифованных образцах при уровне приложенных напряжений – до $\sigma_{изг} = 1422$ МПа. Установлено, что образцы из стали ВКС-180-ИД простояли более 200 сут без разрушения. Таким образом, сталь ВКС-180-ИД при прочности $\sigma_B = 1723$ –1873 МПа не проявила склонности к коррозионному растрескиванию.

В результате проведенных исследований разработана новая мартенситостареющая сталь ВКС-180-ИД, работоспособная до 400°C и превосходящая по прочности на ~50% серийно применяемые для валов ГТД стали мартенситного класса, обладающая комплексом высоких физико-механических свойств.

*О.А. ТОНЫШЕВА, Н.М. ВОЗНЕСЕНСКАЯ,
Э.А. ЕЛИСЕЕВ, А.Б. ШАЛЬКЕВИЧ*

**НОВАЯ ВЫСОКОПРОЧНАЯ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННАЯ
АЗОТСОДЕРЖАЩАЯ СТАЛЬ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ**

Повышение весовой эффективности изделий авиационной техники при высокой надежности и долговечности их работы является одной из важнейших задач современного материаловедения. Актуальной является также задача снижения стоимости применяемых материалов, в частности создание экономнолегированных коррозионностойких сталей с высокими характеристиками физико-механических свойств.

Перспективными являются коррозионностойкие азотсодержащие хромоникелевые стали мартенситного и переходного (аустенито-мартенситного) класса, обладающие лучшим сочетанием механических и коррозионных свойств по сравнению с коррозионностойкими углеродсодержащими сталями с аналогичной прочностью. Частичная замена углерода азотом позволяет обеспечить получение у них структуры, не

содержащей карбидов хрома, снижающих показатели вязкости разрушения и коррозионной стойкости.

Легирование стали азотом позволяет исключить или уменьшить содержание дорогостоящих легирующих элементов, таких как Со, Мо. Кроме того, азот, снижая энергию дефектов упаковки, позволяет повысить пластические свойства стали наряду с увеличением прочностных характеристик [1, 2].

Азот сужает область существования дельта-феррита, охрупчивающего сталь, и позволяет поэтому уменьшить количество элементов, стабилизирующих аустенит, таких как углерод и никель. Некоторыми исследователями было показано, что азот, находящийся в твердом растворе, увеличивает стойкость стали против общей коррозии [3].

Высокая прочность коррозионностойкой азотсодержащей стали переходного (аустенито-мартенситного) класса может быть получена при суммарном содержании углерода и азота 0,26–0,32%. В указанном диапазоне желательно иметь более высокое содержание азота, которое в зависимости от химического состава может быть сверхравновесным.

Однако сталь, легированная сверхравновесным содержанием азота (ввиду его малой растворимости в мартенсите) склонна к образованию газовых раковин и пузырей при затвердевании металла в процессе разлива; получение качественной азотистой стали требует мер, препятствующих выделению азота. Удержание азота в твердом растворе возможно путем легирования элементами, обладающими повышенным сродством к азоту. К таким элементам относятся хром, марганец, молибден, ванадий.

Однако интенсивное легирование хромом, марганцем, молибденом для усвоения азота в стали снижает точку начала мартенситного превращения, структура таких сталей преимущественно аустенитная. Стали аустенитного класса обладают прочностью не выше 1000 МПа.

Для получения высоких прочностных свойств и сохранения пластичности содержание мартенситной фазы в стали должно быть не менее 80%. Поскольку растворимость азота в мартенсите мала, то для получения в металле сверхравновесного содержания азота сталь такого фазового состава требует применения специального метода выплавки.

В ВИАМ совместно с ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова была разработана высокопрочная азотсодержащая коррозионностойкая сталь ВНС-72 переходного (аустенито-мартенситного) класса без дефицитных легирующих элементов (Со, Мо), обладающая наряду с высокой прочностью $\sigma_B = 1750$ МПа высокими пластичностью и вязкостью разрушения.

Для получения максимально возможного содержания азота (0,14–0,15% по массе) был рассчитан химический состав по структурной диаграмме Я.М. Потака и Е.А. Сагалевич [4], который позволил обеспечить требуемый фазовый состав стали.

Исследования проводили на металле промышленной плавки, выплавленном в открытой печи с последующим электрошлаковым переплавом на ОАО «Металлургический завод «Электросталь»». Азот в плавку вводился с использованием азотированного феррохрома. В процессе плавки проводился контроль фазового состава путем замера уровня магнитной индукции литых проб с помощью прибора ИФСС, что позволяет определить соотношение магнитной (мартенсит) и немагнитной (аустенит) фаз [4]. Корректировка фазового состава во время выплавки производилась доводкой до необходимого уровня намагниченности литых проб путем добавления соответствующих элементов.

По ходу плавки контролировалось содержание азота и при необходимости его увеличения в расплав вводился азотированный марганец. Окончательно марочного содержания азота добивались введением в расплав азотированного феррохрома перед разливкой стали. В литом состоянии содержание мартенсита составило от 30 до 50%, остальное – аустенит. Полученный после электрошлакового переплава слиток проковывался на прутки с различной стороной квадрата (90, 150 и 200 мм) при температуре 950–1150°C. Упрочняющая термообработка стали состояла из следующих операций: закалка, обработка холодом, низкий отпуск.

Содержание остаточного аустенита оценивали по величине намагниченности насыщения $4\pi I_s$ на приборе типа «Штеблейн».

Металлографические исследования проводились на шлифах, подвергнутых электролитическому травлению в 10%-ном растворе щавелевой кислоты.

Стойкость к коррозионному растрескиванию определяли в 3%-ном растворе NaCl при 35°C в камере солевого тумана, а также в условиях умеренного морского климата (Геленджикский центр климатических испытаний им. Г.В. Акимова) при приложенном напряжении $\sigma_{\text{прил}} = 980$ МПа.

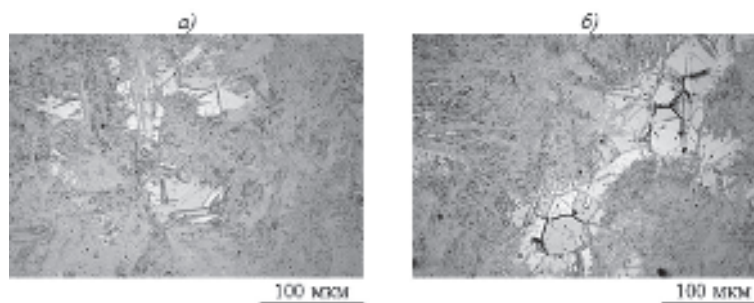


Рис. 1. Микроструктура ($\times 100$) стали ВНС-72 после закалки, обработки холодом и отпуска:

a – мартенсит, остаточный аустенит, отдельные карбиды (закалка с 1050°C); *б* – мартенсит, остаточный аустенит и разорванная карбидная сетка в аустенитных полях (закалка с 1020°C)

Для выбора оптимальной температуры закалки проводили исследование микроструктуры стали ВНС-72 после закалки с разных температур, обработки холодом при температуре $(-70 \div -80)^\circ\text{C}$ и низком отпуске. Установлено, что, в случае применения высокотемпературной закалки с 1050°C в масле, в микроструктуре стали присутствуют мартенсит, остаточный аустенит и отдельные карбиды (рис. 1, *a*). В случае применения нагрева до более низких температур (1020°C) сохраняются карбиды по границам зерен (рис. 1, *б*), которые снижают пластичность и вязкость, а также коррозионную стойкость.

Механические свойства стали ВНС-72 представлены в таблице. Как видно из сравнения с аналогами, новая сталь имеет конкурентоспособный комплекс показателей прочности и надежности.

В дополнение к данным, приведенным в таблице, проводились испытания стали ВНС-72 на ударную вязкость при температуре -70°C : $KCU^{-70} = 100\text{--}120$ Дж/см²; $KCV^{-70} = 40\text{--}50$ Дж/см² ($r_H = 0,25$ мм).

**Механические свойства высокопрочных коррозионностойких сталей
аустенито-мартенситного класса**

Свойства	Значения свойств сталей			
	ВНС-72	ВНС-5	ВНС-43	АМ 355 (США)
σ_B , МПа	1750	1470	1570	1550
$\sigma_{0,2}$, МПа	1350	1200	1225	1250
ψ , %	50–55	50	50	38
KCV^{20° , Дж/см ² ; ($r_H = 0,25$ мм)	80	90	70	–
СРТУ: dI/dN , мм/цикл (при $\Delta K = 31$ МПа $\sqrt{м}$; $R = 0,1$; $f = 5$ Гц)	0,22	0,31	0,25–0,30	–
K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$	145	175	130	86
МЦУ: σ_{max} , МПа (при $N = 200$ цикл; $R = 0,1$; $f = 5$ Гц; $K_t = 2,2$)	700	400	500	–

Получение достаточно высоких показателей пластичности и вязкости разрушения достигается при наличии в стали 12–15% остаточного аустенита.

Исследования сопротивления коррозионному растрескиванию при напряжении 980 МПа, проведенные в течение более 6 мес в камере солевого тумана КСТ-35 и в условиях умеренного морского климата, показали отсутствие разрушения экспериментальных образцов.

Сталь ВНС-72 хорошо сваривается аргоно-дуговой (АрДЭС) и электронно-лучевой (ЭЛС) сваркой. После сварки необходимо проведение упрочняющей термообработки для устранения напряжений и неоднородности в структурах зоны сварного шва и зоны термического влияния. После упрочняющей термической обработки структура околошовной зоны дисперсная, однородная, мартенситная с некоторым количеством аустенита (рис. 2).

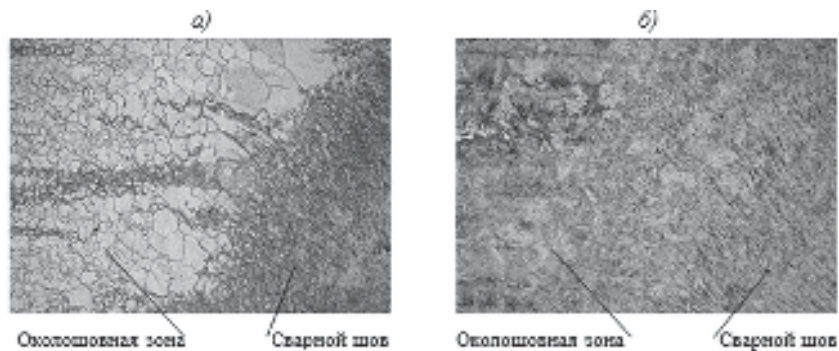


Рис. 2. Микроструктура ($\times 100$) околошовной зоны сварных соединений (сварка АрДЭС, присадка «лапша» из ВНС-72) из стали ВНС-72 без термообработки (а) и после упрочняющей термообработки (б)

Проведены испытания при растяжении при комнатной температуре сварных образцов с присадкой «лапшой» из стали ВНС-72, в том числе с подваркой по шву. Среднее значение кратковременной прочности сварного соеди-

нения – $\sigma_{в.св} = 1508$ МПа, что составляет 0,87–0,89 от прочности основного металла стали ВНС-72. Местом разрушения образцов при растяжении являлась зона сварного шва. Разрушенные образцы имели вязкие изломы.

На сварных образцах с острым V-образным надрезом в термообработанном состоянии получены высокие значения ударной вязкости: $KCV^{20^\circ} = 60$ Дж/см², $KCV^{-70^\circ} = 47$ Дж/см².

Применение электронно-лучевой сварки позволяет получить более высокий предел прочности сварных образцов – $\sigma_{в.св} = 1640$ МПа. Ударная вязкость по сварному шву на образцах с острым надрезом составила $KCV^{20^\circ} = 40$ –47 Дж/см²; $KCV^{-50^\circ} = 20$ –25 Дж/см².

ЛИТЕРАТУРА

1. Костина М.В., Банных О.А., Блинов В.М. Особенности сталей, легированных азотом // МиТОМ. 2000. № 12. С. 3–6.
2. Блинов В.М., Елистратов А.В., Колесников А.Г. и др. Влияние термической обработки на структурные превращения и свойства высокоазотистых сталей // МиТОМ. 2000. № 6. С. 19–24.
3. Королев М.Л. Азот как легирующий элемент стали. М.: Металлургия. 1961. 161 с.
4. Потак Я.М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия. 1972. 208 с.

М.Р. ОРЛОВ, О.Г. ОСПЕННИКОВА, В.И. ГРОМОВ

РАЗВИТИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОДОРОДНОЙ И БЕЙНИТНОЙ ХРУПКОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Обоснование длительных сроков эксплуатации сложных технических систем (СТС) в различных климатических условиях требует всесторонней оценки условий нагружения конструкции и исследования поведения материалов в условиях длительной работы, включая оценку склонности к коррозионному повреждению и замедленному разрушению. Необходим детальный анализ производственно-технологических факторов, оказывающих существенное влияние на длительную работоспособность материалов.

Разработка крупногабаритных деталей и элементов конструкции СТС требует учета в расчетах коэффициентов запаса прочности особенностей структурно-фазовых превращений в сталях, обусловленных низкой скоростью нагрева и охлаждения заготовок в процессе горячей деформации и последующей термической обработки, с неизбежно возникающими градиентами температур, предопределяющими структурную неоднородность и высокий уровень остаточных напряжений в изделиях.

Длительная и безопасная эксплуатация СТС должна базироваться на ресурсных испытаниях материалов и элементов конструкции в условиях воздействия климатических факторов, таких как коррозионная среда, циклические (суточные и сезонные) изменения температуры и напряжений в сочетании с определением склонности материалов к замедленному разрушению.