

УДК 669.014.018.8

Е.Н. Каблов¹, М.М. Бакрадзе¹, В.И. Громов¹, Н.М. Вознесенская¹, Н.А. Якушева¹

НОВЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ И КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СТАЛИ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ РАЗРАБОТКИ ФГУП «ВИАМ» (обзор)

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11

Одной из главных задач при создании перспективных изделий авиационной техники является задача повышения весовой эффективности и надежности изделия, что достигается благодаря разработке новых материалов, превосходящих по своим механическим характеристикам применяемые аналоги.

Во ФГУП «ВИАМ» для решения вопроса обеспечения длительного ресурса работы деталей планера и двигателя, в том числе валов ГТД и деталей подшипников, разработаны новые теплоустойчивые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали с повышенными характеристиками прочности, ударной вязкости, усталостной долговечности и жаропрочности, а также технологии их производства, термической и химико-термической обработки.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, коррозия, подшипник, деформация, шасси, двигатель, механические свойства, азот, химико-термическая обработка, усталость, предел прочности.

Е.Н. Kablov¹, М.М. Bakradze¹, V.I. Gromov¹, N.M. Voznesenskaya¹, N.A. Yakusheva¹

NEW HIGH STRENGTH STRUCTURAL AND CORROSION-RESISTANT STEELS FOR AEROSPACE EQUIPMENT DEVELOPED BY FSUE «VIAM» (review)

One of the main tasks in creating perspective aircraft products is the increasing of the weight efficiency and reliability of the parts; this is achieved through the development of new materials with improved mechanical characteristics in comparison with analogues.

To solve the issue of ensuring a long service life of an airframe and engine parts, including gas turbine engine shafts and bearing parts, FSUE «VIAM» has developed new heat-resistant high-strength structural and corrosion-resistant steels with increased characteristics of strength, toughness, fatigue life and heat resistance, as well as technologies for their production, heat and chemical-thermal treatment.

Keywords: high strength steel, corrosion, bearing, deformation, chassis, engine, mechanical properties, nitrogen, thermochemical treatment, fatigue, tensile strength.

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

Введение

В настоящее время отечественными и зарубежными научными центрами, предприятиями и производственными организациями проводятся исследования по разработке состава новых и совершенствованию серийных высокопрочных сталей, технологий их получения и термической обработки, направленные на повышение прочностных характеристик, ударной вязкости, надежности, коррозионной стойкости. Особое внимание уделяется снижению стоимости получаемых полуфабрикатов и повышению технологичности при изготовлении деталей из них [1–4].

Основные усилия разработчиков новых сталей направлены на решение следующих задач:

– создание новых высокопрочных конструкционных сталей, в том числе мартенситостареющих и упрочняемых вакуумной и ионно-вакуумной химико-термической обработкой, позволяющих повысить значения выносливости и прочности материалов;

– создание высокопрочных коррозионно-стойких конструкционных свариваемых сталей, в том числе со сверхравновесным содержанием азота, обладающих высокими характеристиками прочности, ударной вязкости и выносливости;

– создание новых сталей для подшипниковых деталей, по своим характеристикам не уступающих зарубежным аналогам.

Высокопрочные конструкционные стали

В настоящее время все большее применение в отечественной аэрокосмической технике находят высокопрочные конструкционные стали, в том числе цементуемые стали мартенситного класса марок ВКС-10, ВКС-5 и ВКС-7, разработанные во ФГУП «ВИАМ». Данные стали имеют высокую статическую прочность (1300 МПа) при твердости цементованного слоя ≥ 60 HRC.

Для решения проблем обеспечения длительного ресурса изделий и их надежности важное значение имеют технологии упрочняющей термической обработки. Во ФГУП «ВИАМ» разработаны ресурсосберегающие экологически чистые процессы термической и химико-термической обработок, в том числе и в вакууме [5–8].

Преимущества вакуумной термической и химико-термической обработок заключаются в следующем:

- отсутствие окисления поверхности и, как следствие, уменьшение уровня припусков на механическую обработку;
- получение однородного слоя по сечению детали;
- исключение водородного охрупчивания поверхности стали;
- снижение до минимума коробления деталей и их деформации;
- гарантирование максимального качества термообработки;
- экологическая безопасность проведения процессов;
- экономия расхода электрической энергии;
- автоматическое управление процессом.

Разработанная во ФГУП «ВИАМ» цементуемая дисперсионно-твердеющая сталь ВКС-10У-Ш после вакуумной цементации обеспечивает длительно высокую теплостойкость на уровне 450 °С и кратковременно – до 500 °С, а также твердость цементуемой поверхности – не менее 60 HRC (табл. 1).

При разработке теплостойкой стали ВКС-10У-Ш применялась схема комплексного легирования карбидообразующими элементами: Cr, Mo, W, V, которые оказывают блокирующее влияние на рост субзерен и карбидов при отпуске и обеспечивают выде-

ление специальных карбидов при старении цементованного слоя, чем еще больше измельчают размеры субзерен, способствуют упрочнению стали, и обеспечивают теплоустойкость диффузионного слоя. Основными фазами, присутствующими в диффузионном слое стали ВКС-10У-Ш, являются карбиды железа (M_3C) и хрома ($M_{23}C_6$). После проведения старения наблюдается присутствие фаз, полученных в результате дисперсионно-карбидного упрочнения, – тугоплавких карбидов (M_6C , $M_{23}C_6$) на основе вольфрама и молибдена, следы карбидов ниобия и ванадия (MC), которые повышают теплостойкость диффузионного слоя.

В авиастроении для крупногабаритных деталей (кулачки, оси, фланцы, основные опоры и др.) нашли применение разработанные высокопрочные свариваемые средне-легированные конструкционные стали марок ЭИ643 (40ХН2СМА) и 30ХГСН2А (30ХГСН2МА), упрочняемые закалкой и низким отпуском и работоспособные до 250 °С. Повышения сопротивления коррозионному растрескиванию и уровня прочности при сохранении характеристик надежности сталей этого класса удалось достигнуть путем усовершенствования системы легирования, а также разработки оптимальной термической обработки при одновременном улучшении технологии выплавки и деформации. Взамен стали ЭИ643, обладающей низким сопротивлением коррозионному и водородному растрескиванию, для изготовления крупногабаритных деталей планера во ФГУП «ВИАМ» разработана высокопрочная конструкционная сталь ВКС-9 (35ХС2Н3М1ФА), работоспособная в интервале температур от -70 до +250 °С.

Благодаря разработанным технологиям деформации и термической обработки, из стали можно изготавливать крупногабаритные полуфабрикаты (поковки диаметром более 300 мм) без потери прочностных свойств при сохранении высоких значений характеристик надежности, ударной вязкости, пластичности, сопротивления коррозионному растрескиванию. Сталь ВКС-9 превосходит по своим свойствам применяемую

Таблица 1

Механические свойства цементуемых сталей

Сталь	σ_b	σ_{-1} при $N=2 \cdot 10^7$ циклов	Теплостойкость, °С
ВКС-10У-Ш	1300	900	500
ВКС-5-Ш	1270	600	350
ЭИ415-Ш	1080	820	320
ВКС-7-Ш	1270	930	220

Таблица 2

Механические свойства полуфабрикатов из сталей ВКС-9, ВКС-12, 300М и 30ХГСН2А

Сталь	Механические свойства (не менее)				
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	ψ , %	σ_{-1} , МПа, при $N=10^7$ циклов	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$
	МПа				
ВКС-9	1950	1570	25	720	70
ВКС-12	2100	1700	35	750	60
30ХГСН2А	1700	1350	45	660	80
300М (США)	1930	1570	25	–	65

отечественную сталь 30ХГСН2А и не уступает зарубежной стали 300М (США), применяемой для деталей шасси самолета МС-21. В отличие от стали 300М сталь ВКС-9, вследствие более низкого содержания углерода и повышенного уровня никеля в составе, имеет более высокие значения вязкости разрушения (K_{1c}) и сопротивления коррозионным поражениям.

Возрастающие требования к повышению ресурса работы деталей заставляют изыскивать возможности повышения вязкости разрушения, выносливости, коррозионной стойкости этого класса сталей. Существенное повышение прочностных характеристик данного класса получено на стали ВКС-12, разработанной во ФГУП «ВИАМ». При прочности >2100 МПа, достигаемой за счет твердорастворного упрочнения, данная сталь обладает высокими значениями трещиностойкости, пластичности и сопротивления усталости (табл. 2).

Сталь ВКС-9 применяется в изделиях ПАО «Компания «Сухой» и ПАО «Авиационный комплекс имени С.В. Ильюшина» для изготовления крупномерных силовых свариваемых деталей планера.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны высокопрочные конструкционные безуглеродистые мартенситостареющие стали марок ВКС-170, ВКС-180 и ВКС-210 с системой легирования Fe–Ni–Co–Mo–Ti, имеющие уровень прочности σ_B – от 1570 до 2100 МПа. Разработанные стали, благодаря низкому содержанию углерода ($\leq 0,03\%$ (по массе)) и легированию их кобальтом и никелем, обеспечивают получение высокопластичного «массивного мартенсита», содержащего большое количество дислокаций и имеющего невысокую твердость (в закаленном состоянии 24–32 HRC), что обеспечивает высокую технологичность сталей и позволяет проводить различные виды механической обработки в закаленном состоянии.

Уникальное сочетание высоких прочностных свойств и характеристик пластичности, ударной вязкости и выносливости, а также теплопрочности и низкой хладноломкости достигается благодаря упрочнению сталей при относительно низких температурах ста-

рения (~500°C) в результате дисперсионного твердения и выделения интерметаллидных фаз (преимущественно Ni_3Ti и Ni_3Al) из пересыщенной легирующими элементами практически безуглеродистой пластичной мартенситной матрицы. При этом не возникает поводок и короблений, обычных для среднелегированных сталей, которые упрочняются закалкой с высоких температур. Изделия из мартенситостареющих сталей после упрочняющей термообработки либо совсем не обрабатывают механически, либо удаляют только тонкий слой, окисленный при низкотемпературном нагреве [9–12].

Исследования полученных характеристик сопротивления усталости при много- (МНЦУ) и малоцикловых усталостных (МЦУ) нагружениях, длительной прочности и ползучести мартенситостареющих сталей показали, что данные стали можно рассматривать как перспективный материал для авиационных двигателей (валов ГТД и крупномерных деталей подвески двигателя), работающих при температурах до 400 °С. В табл. 3 представлен комплекс свойств сталей ВКС-170, ВКС-180 и ВКС-210 в сравнении с применяемой для валов ГТД жаропрочной хромистой сталью ЭП517 и зарубежной сталью Maraging 250 (VaskoMax-250).

Повышение долговечности и весовой эффективности деталей ГТД благодаря использованию мартенситостареющих сталей позволило применить сталь ВКС-170 для изготовления крупногабаритных деталей подвески двигателя (кронштейны, тяги, качалки), а также для вала турбины низкого давления (ТНД) двигателя ПД-14, а сталь ВКС-180 рекомендовать для вала ТНД перспективного вертолетного двигателя.

Высокопрочные коррозионностойкие стали

При работе в коррозионных средах необходимы материалы, обладающие высокой коррозионной стойкостью. В авиационной технике к коррозионностойким сталям предъявляют требования по высокой прочности с одновременно высокой пластичностью и вязкостью разрушения, сопротивлению повторным нагрузкам и стойкости к коррозионному растрескиванию.

Механические свойства полуфабрикатов из сталей ВКС-170, ВКС-180, ВКС-210, ЭП517 и Maraging 250

Сталь	Температура испытания, °С	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{100}^{400^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{400^\circ}$	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$
		МПа				
ВКС-170	20	1570	1520	–	–	115
	400	1180	1330	1050	800	–
ВКС-180	20	1720	1610	–	–	105
	400	1380	1250	1100	800	–
ВКС-210	20	1910	1810	–	–	80
	400	1765	1650	1300 (на базе 500 ч)	–	–
ЭП517	20	1100	950	–	–	–
	400	850	800	880	490	
Maraging 250	20	1700	1600	–	–	–
	400	1400	1370			

Наиболее перспективными являются коррозионностойкие хромоникелевые стали мартенситного и переходного (аустенито-мартенситного) классов, легированными совместно углеродом и азотом [13, 14]. Азот, как элемент внедрения, повышает прочность материалов, при этом азотсодержащие стали обладают более высокими характеристиками пластичности, вязкости разрушения, коррозионной стойкости по сравнению с традиционно применяемыми хромоникелевыми коррозионностойкими сталями, легированными только углеродом.

Высокопрочная коррозионностойкая экономолегированная сталь ВНС-74 (05X16H5AB-III), содержащая повышенное количество азота (0,12–0,13% (по массе)), разработана во ФГУП «ВИАМ» совместно с ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова для изготовления деталей крепежа.

В машиностроении для изготовления крепежных деталей (гаек, болтов и т. д.), в том числе деталей малых размеров и сложной формы, используется метод холодной высадки, позволяющий изготавливать изделия, которые практически не требуют последующей механической обработки [15]. Указанный метод обеспечивает деталям надежность и прочность путем создания в них благоприятного расположения волокон [5]. Процесс холодной высадки зависит от многих факторов, основными из которых являются пластические свойства материала, подвергаемого

деформации, а также величина зерна, его химический состав и механические свойства.

Сталь ВНС-74, которая разработана для изготовления высадного крепежа, получаемого методом холодной деформации, обладает повышенными характеристиками прочности, а также хорошей технологичностью (табл. 4).

Исследование крепежных деталей, изготовленных на ОАО «Нормаль» из стали ВНС-74, показало, что при обеспечении высокой прочности детали обладают высокой пластичностью и не чувствительны к перекосу 6 градусов. Сталь не чувствительна к острым концентраторам напряжения – $\sigma_b^H / \sigma_b = 1,4$ при $K_f=4,0$. Сталь ВНС-74 рекомендуется к использованию при температурах эксплуатации от -70 до +200°С во всеклиматических условиях.

Для силовых деталей планера во ФГУП «ВИАМ» разработана высокопрочная экономолегированная сталь переходного класса ВНС-72 (15X14H4ГАМ) с повышенным содержанием азота (0,14–0,15% (по массе)). Сталь упрочняется за счет суммарного содержания азота и углерода ~0,30% (по массе) и обладает помимо высоких характеристик прочности повышенными значениями пластичности, ударной вязкости, трещиностойкости и сопротивления усталости. Сталь ВНС-72 превосходит отечественную сталь ВНС-5 по сопротивлению усталостным нагрузкам, а зарубежный аналог АМ-355 – по пластичности, ударной вязкости и сопротивлению усталости.

Таблица 4

Механические свойства сталей ВНС-74 и 30ХГСА

Сталь	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_{cp}	σ_{-1} при $N=10^7$ циклов
	МПа			
ВНС-74	1400	1200	950	730
30ХГСА	1080	830	705	500

Таблица 5

Механические свойства высокопрочных коррозионностойких сталей

Сталь	σ_B	$\sigma_{0,2}$	ψ , %	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$	МЦУ: σ_{max} , МПа, при $N=2 \cdot 10^5$ циклов ($K_f=2,2$)
	МПа				
ВНС-75	1760	1320	50	154	730
ВНС-72	1750	1300	45	140	700
АМ-355 (США)	1500	1250	38	86	350
ВНС-65	1670	1250	45	145	590
ВНС-5	1470	1080	55	174	450

Применение микролегирования редкоземельными металлами (РЗМ) при разработке высокопрочных сталей является перспективным направлением по повышению конструктивной прочности материала при сохранении высокого уровня ударной вязкости и пластичности. Преимущества микролегирования РЗМ состоят в следующем:

- РЗМ обладают высокой термодинамической активностью в расплавах, что позволяет использовать их для раскисления, дегазации, десульфурации и модифицирования металла;
- добавки РЗМ улучшают макроструктуру стали, уменьшают зональную ликвацию по сере, фосфору и углероду и повышают плотность металла;
- введение РЗМ повышает технологическую (горячую) пластичность металла за счет снижения неметаллических включений в металле;
- РЗМ способствуют снижению анизотропии механических свойств по всему сечению металла;
- в результате рационального микролегирования РЗМ можно получить мелкозернистую структуру, обладающую более высокими характеристиками ударной вязкости и пластичности с одновременным увеличением значений предела текучести, что позволяет реализовать более высокий уровень прочности металла.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны состав и технология изготовления высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-75, микролегированной РЗМ, которые обеспечивают снижение вредных примесей и повышают прочность, пластичность и ударную вязкость материала. Уровень прочности разработанной стали переходного (аустенитомартенситного) класса составляет $\sigma_B \geq 1760$ МПа.

За основу химического состава стали ВНС-75 взята сталь ВНС-65, дополнительно

легированная кобальтом и редкоземельными элементами (иттрием, лантаном, церием и неодимом). Легирование РЗМ позволило получить весьма низкое содержание вредных примесей (кислорода и серы): $O_2=0,006-0,008\%$ (по массе), $S=0,0035-0,0046\%$ (по массе).

По сравнению с существующими высокопрочными коррозионностойкими сталями ВНС-5 и ВНС-65 сталь ВНС-75 обладает более высокими характеристиками прочности, сопротивлением повторным нагрузкам при сохранении высоких значений пластичности и ударной вязкости (табл. 5).

Сталь ВНС-75 рекомендована для высоконагруженных деталей планера, силового крепежа, деталей шасси авиационной техники с рабочей температурой от -70 до $+200$ °С во всеклиматических условиях.

В некоторых случаях проведение процессов термической обработки сложных крупногабаритных сварных конструкций с большой разницей по сечению весьма проблематично. Для силовых свариваемых деталей без последующей термической обработки разработана высокопрочная коррозионностойкая сталь ВНС-73 (10X13H4K4M3C2A), которая не требует термической обработки после сварки [14].

Сталь ВНС-73 разработана на базе широко применяемой стали ЭП817 (06X14H6Д2МБТ) аналогичного назначения, однако комплексное дополнительное легирование этой стали кремнием, кобальтом и азотом позволило получить материал с повышенными характеристиками прочности и надежности (сопротивление МЦУ и скорость роста трещины усталости (СРТУ)) как сварных, так и несварных деталей конструкций (табл. 6).

Сталь ВНС-73 предназначена для изготовления силовых деталей планера, длительно

Таблица 6

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

Сталь	σ_B	$\sigma_{0,2}$	ψ , %	СРТУ: dI/dN , мм/цикл, при $\Delta K=31$ МПа $\sqrt{м}$	МЦУ: σ_{max} , МПа, при $N=2 \cdot 10^5$ циклов ($K_f=2,2$)	$\sigma_{B,св}$, МПа
	МПа					
	не менее					
ВНС-73	1375	1110	55	0,17	607	1250
ЭП817Ш	1230	930	55	0,3	490	1078

работающих при температурах от -70 до $+200$ °С во всеклиматических условиях. Сталь хорошо сваривается аргоно-дуговой сваркой (АрДЭС) с присадкой и без присадки, а после сварки не требует обязательной термообработки.

Высокопрочные стали для деталей подшипников

В настоящее время в России для изготовления теплостойких подшипников широко используется сталь ЭИ347 (8X4B9Ф2-Ш). Сталь обладает высокими характеристиками теплостойкости и прочности. Однако в структуре этой стали наблюдается повышенная карбидная неоднородность, что снижает ресурс работы детали, способствуя выкрашиванию рабочей поверхности подшипников.

За рубежом для изготовления теплостойких подшипников применяется сталь M50, отличающаяся высокими прочностью и теплостойкостью с одновременным обеспечением низкой карбидной неоднородности.

Во ФГУП «ВИАМ» создана теплостойкая подшипниковая сталь ВКС241-ВИ (8X5M3BФБ-ВИ), не уступающая зарубежной стали M50 и превосходящая сталь ЭИ347 по карбидной однородности и технологичности при горячей пластической деформации. Разработанная сталь содержит значительно меньшее количество дорогого легирующего элемента вольфрама в сравнении с российским аналогом – сталью ЭИ347 (1% вместо 9%) и на 1% меньше молибдена, чем зарубежный аналог – сталь M50.

Во ФГУП «ВИАМ» совместно с АО «Металлургический завод «Электросталь» разработана технология вакуумно-индукционной выплавки с последующими вакуумно-дуговым переплавом и горячей пластической деформацией стали ВКС241-ВИ, обеспечивающими получение прутков с высоким уровнем чистоты металла и минимальной карбидной неоднородностью. Упрочнение стали при термической обработке происходит за счет выделения дисперсных карбидов Me_7C_3 , $Me_{23}C_6$ (на базе хрома), Me_2C (молибдена) и MeC (ванадия), а также основного карбида теплостойких сталей M_6C (вольфрама и молибдена). Полученный металл после термической обработки обеспечивает получение теплостойкости деталей подшипников до 500 °С при твердости не менее 60 HRC и однородной структуры без выделения грубых карбидов.

В условиях ОАО «ЕПК Самара» при технологическом сопровождении ФГУП «ВИАМ» изготовлена опытно-промышленная партия подшипников и исследовано их качество. Установлено, что в результате проведенной упрочняющей термической обработки сфор-

мирована структура мелкозернистого мартенсита и дисперсных карбидов. Твердость колес подшипников составляет 62–62,5 HRC, шариков 63,5–64 HRC.

В ОАО «ЕПК Самара» проведены испытания подшипников из стали ВКС241-ВИ на стендовой установке, в результате которых установлено, что все подшипники отработали установленный ресурс. После необходимой наработки все подшипники имеют удовлетворительное состояние и могут быть рекомендованы для применения в изделиях авиационной техники.

Высокопрочные стали для деталей подшипников со сверхравновесным содержанием азота

Все более широкое применение в мире в различных отраслях промышленности находят стали со сверхравновесным содержанием азота. Такие стали требуют специальных методов выплавки и рафинирующего переплава – в частности, в печах электрошлакового переплава под избыточным давлением азота. Электрошлаковый переплав под давлением позволяет получать слитки с плотной беспористой и дисперсной макроструктурой.

Для деталей трения и деталей, работающих на износ (подшипники, режущие инструменты, сверла), в Германии фирмой Energietechnik-essen разработана сталь Cronidur30 со сверхравновесным содержанием азота (до 0,4% (по массе)), а австрийской фирмой Böhler разработана коррозионно-стойкая сталь N360 аналогичного химического состава и структурного состояния.

Указанные стали отличаются улучшенными по сравнению с обычными хромистыми и хромомолибденовыми сталями типа AISI 440 коррозионными свойствами и ударной вязкостью ($KCU \approx 30$ Дж/см²), высокой твердостью (58–60 HRC) и прочностью ($\sigma_B \approx 2000$ МПа). Высокое содержание азота в этих сталях обеспечивается применением электрошлакового переплава под давлением (ЭШПД).

Поскольку предельная равновесная растворимость азота в высокопрочных коррозионно-стойких сталях мартенситного класса при атмосферном давлении не превышает 0,10%, во ФГУП «ВИАМ» приобретена печь электрошлакового переплава под давлением ДЭШП-0,1, разработанная специально по техническому заданию ФГУП «ВИАМ» и поставленная ООО «НПФ «Комтерм», позволяющая выплавлять стали со сверхравновесным содержанием азота $>0,2\%$ (по массе) под избыточным давлением до 30 ат (3 МПа) [16].

Во ФГУП «ВИАМ» на собственные средства проведены работы по разработке состава и технологий ЭШПД, горячей деформации и

Таблица 7

Механические свойства сталей ВНС78, 95X18 и Cronidur30

Сталь	Твердость HRC	σ_b , МПа	Ударная вязкость, Дж/см ²	
			KCU	KC (без надреза)
ВНС78	58–59	2250–2350	25–31	≥120
95X18	59	1980–2200	6	–
Cronidur30	58–62	2150	–	80

термообработки для получения прутков из коррозионностойкой износостойкой стали мартенситного класса ВНС78 (30X15АМФ) со сверхравновесным содержанием азота 0,3% (по массе). В отличие от стали 95X18, упрочняемой до 1% (по массе) углерода и содержащей в микроструктуре грубые карбидные включения, новая сталь ВНС78 имеет структуру с равномерно распределенными по всему телу зерна дисперсными карбонитридами, благоприятную для изготовления прецизионных деталей малых размеров.

Для улучшения технологических характеристик при сохранении высокой прочности, а также повышения ударной вязкости сталь дополнительно легирована ванадием и редкоземельными элементами, в ней увеличено содержание никеля и уменьшено количество азота. Введение ванадия позволило наряду с измельчением зерна получить высокую прочность (твердость) за счет образования карбонитридов ванадия. Измельчение ванадием структуры повысило способность стали к пластической деформации без образования горячих трещин.

Разработанную сталь предполагается применить для изготовления прецизионных шариковых подшипников качения [17–19]. В табл. 7 представлены сравнительные свойства сталей для подшипников ВНС78, серийной стали 95X18 и зарубежной стали Cronidur30.

Для получения стали с равномерным распределением сверхравновесного азота по объему слитка во ФГУП «ВИАМ» разработаны параметры выплавки под давлением (ЭШПД) – выбраны размер кристаллизатора, схема подачи азотоносителя и размер подаваемой фракции [20–24].

Разработанные параметры выплавки позволили обеспечить равномерное распределение азота по высоте и в поперечном направлении слитка.

В результате проведенных исследований разработаны режимы отжига и упрочняющей термической обработки стали ВНС78. После отжига микроструктура представляет собой высокоотпущенный мартенсит и карбонитриды, при этом обеспечивается твердость НВ<269, позволяющая проводить механическую обработку детали.

После упрочняющей термической обработки микроструктура стали ВНС78 – мартенсит и равномерно распределенные карбонитриды. После закалки, обработки холодом и отпуска (старения) достигается твердость 58–59 HRC.

Стали для работы при криогенных температурах

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны коррозионностойкие мартенситостареющие стали повышенной прочности с весьма низким содержанием углерода, легированные хромом, никелем, молибденом и титаном. Титан вводится в небольших количествах для связывания углерода и азота в карбонитриды.

Сталь ВНС-25 (03X12Н10МТ-ВД) предназначена для работы при криогенных температурах -253 °С. Сталь обладает высокими прочностью ($\sigma_b \geq 980$ МПа) и ударной вязкостью, хорошо сваривается всеми видами сварки, не требует термической обработки после сварки и пайки. Сталь внедрена для ответственных деталей аэрокосмической техники.

Сталь ВНС-49 (03X9Н9К5М3) обладает более высокой прочностью ($\sigma_b \geq 1130$ МПа) и рекомендуется для силовых деталей и узлов (баков, гидравлических насосов, арматуры и др.), работающих при криогенных температурах до -253 °С, в том числе сварных, подвергаемых и не подвергаемых термической обработке после сварки [25–27]. Свойства мартенситостареющих сталей представлены в табл. 8.

Таблица 8

Свойства мартенситостареющих сталей

Сталь	Температура испытания, °С	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_{-1}^H , МПа, при $N=2 \cdot 10^5$ циклов ($K_f=2,2$)	KCU	KCV
		МПа				
ВНС-25	+20	980	910	350	190	–
	-253	1620	1390	–	98	39
ВНС-49	+20	1130	1080	412	134	–
	-253	1815	1665	–	75	–

Таблица 9

Механические свойства сталей ВНС-25, 10X18Н9Т и AISI 304 LN для применения при криогенных температурах

Сталь	σ_b , МПа			KCU, Дж/см ²	
	при температуре, °С				
	+20	-196	-253	-196	-253
ВНС-25	980	134	1617	117	83
10X18Н9Т	588	1342	1617	137	147
AISI 304 LN	515	1350	–	–	–

Таблица 10

Механические свойства сталей ВНС53-ПД и 12X18Н10Т

Сталь	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_{-1} при $N=2 \cdot 10^5$ циклов
	МПа		
ВНС53-ПД (08X21Г11АН6)	980	780	400
12X18Н10Т	600	280	220

Уровень прочности, достигаемый путем старения стали ВНС-25, определяется содержанием титана, а стали ВНС-49 – содержанием кобальта и молибдена. Хорошая ударная вязкость мартенситостареющих сталей при значительной прочности достигается при содержании никеля ~ (9–10)% (по массе). Высокопрочные мартенситостареющие стали должны содержать достаточное количество никеля для увеличения подвижности дислокаций. Более высокое содержание никеля может сдвигать сталь в аустенитный или переходный класс.

Сравнение механических свойств стали ВНС-25 и сталей аустенитного класса 10X18Н9Т и AISI 304 LN (США) представлено в табл. 9.

Аустенитные стали повышенной прочности

Особый интерес представляет аустенитная коррозионностойкая сталь ВНС53-ПД, отличающаяся значительно более высокими механическими свойствами по сравнению с традиционно применяемой в аэрокосмической технике сталью 12X18Н10Т.

Изготовление трубопроводов гидравлической системы газотурбинных двигателей из стали ВНС53-ПД позволит повысить весовые характеристики двигателя за счет уменьшения толщины стенок трубопроводов, кратко-

временную прочность и сопротивление усталости по сравнению с серийной сталью 12X18Н10Т (табл. 10).

Заключения

Высокие компетенции ФГУП «ВИАМ» в области разработки и производства материалов для аэрокосмической отрасли машиностроения позволяют предложить партнерам разработку:

- новых составов теплостойких конструкционных и коррозионностойких цементуемых, азотируемых и объемно-упрочняемых сталей для деталей машин, включая подшипниковые стали;

- технологических процессов металлургического производства, термической и химико-термической обработки конструкционных и коррозионностойких сталей;

- нормативной документации по металлургическому производству полуфабрикатов, термической и химико-термической обработке, применению, особенностям конструирования и технологии изготовления деталей из конструкционных и коррозионностойких сталей.

Возможна поставка опытно-промышленных партий полуфабрикатов из конструкционных и коррозионностойких сталей, а также деталей и полуфабрикатов после термической и химико-термической обработок.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Ломберг С.В., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
2. Каблов Е.Н. Жаропрочные конструкционные материалы // Литейное производство. 2005. №7. С. 2–7.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

4. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
5. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
6. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситностареющие стали. М.: Металлургия, 1970. 350 с.
7. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1978. 338 с.
8. Громов В.И., Курпякова Н.А., Коробова Е.Н., Седов О.В. Новая теплостойкая сталь для авиационных подшипников // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №2 (74). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23.
9. Шалькевич А.Б., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Маркова Е.С. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для самолетов нового поколения // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 142–150.
10. Покровская Н.Г., Маркова Е.С., Шалькевич А.Б. Высокопрочные конструкционные мартенситностареющие стали в авиастроении // Авиационная промышленность. 2014. №1. С. 24–28.
11. Шалькевич А.Б., Маркова Е.С., Покровская Н.Г. Мартенситностареющая сталь ВКС-180 – перспективный материал для двигателей ГТД // Материал и энергосберегающие технологии для производства ответственных деталей высокоэффективных газотурбинных двигателей, промышленных энергетических силовых установок и приводов: сб. лекций. М.: ВИАМ, 2010. С. 98–103.
12. Щербаков А.И., Крылов С.А., Калицев В.А., Игнатов В.А. Разработка технологии выплавки высокопрочной мартенситностареющей стали ВКС-180-ИД (01Н18К9М5Т), микролегированной РЗМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №2. Ст. 04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-4-4.
13. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиастроении // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: ВИАМ, 2002. С. 180–191.
14. Каблов Е.Н., Кривоногов Г.С. Легирование и фазовая нестабильность высокопрочных коррозионно-стойких сталей // Металлы. 2002. №2. С. 65–73.
15. Мокринский В.И. Производство болтов холодной объемной штамповкой. М.: Металлургия, 1978. 71 с.
16. Гулина И.В., Седов О.В., Яковлев Н.О., Гриневиц А.В. Особенности испытания подшипниковой стали // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №10 (82). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-76-83.
17. Коросташевский Р.В., Зайцев А.М. Авиационные подшипники качения. М.: Оборонгиз, 1963. 340 с.
18. Червяков И.В., Киселева С.А., Рыльникова А.Г. Металлографическое определение включений в стали. М.: Металлургиздат, 1962. 251 с.
19. Приборные шариковые подшипники: справочник / под ред. К.Н. Явленского, В.Н. Нарышкина, Е.Е. Чаадаевой. М.: Машиностроение, 1981. 351 с.
20. Крылов С.А., Евгенов А.Г., Щербаков А.И., Макаров А.А. Новая электрошлаковая печь под давлением ДЭШП-0,1: освоение и перспективы развития // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №5 (41). Ст. 04. URL: <http://www/viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-4-4.
21. Рашев Ц. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. София: Проф. Марин Дринов, 1995. 272 с.
22. Сергеев А.Б., Швед Ф.И., Тулин Н.А. Вакуумный дуговой переплав конструкционной стали. М.: Металлургия, 1974. 260 с.
23. Братухин А.Г., Демченко О.Ф., Долженков Н.Н., Кривоногов Г.С. Высокопрочные коррозионно-стойкие стали современной авиации. М.: МАИ, 2006. 654 с.
24. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // Электрометаллургия. 2016. №9. С. 30–41.
25. Бакрадзе М.М., Громов В.И. Новые высокопрочные конструкционные стали разработки ФГУП «ВИАМ» // Высокопрочные стали для аэрокосмической техники и технологии их производства: материалы Всерос. науч.-техн. конф. (Москва, 6 сент. 2019 г.). М.: ВИАМ, 2019. 1 электрон. опт. диск. С. 6–14.
26. Потак Я.М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 210 с.
27. Беляков Л.Н., Петраков А.Ф., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Новые высокопрочные стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 1977. №8. С. 12–14.