

УДК 669.018.292

В.И. Громов<sup>1</sup>, Н.М. Вознесенская<sup>1</sup>, Н.Г. Покровская<sup>1</sup>, О.А. Тонышева<sup>1</sup>

## **ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ И КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СТАЛИ ФГУП «ВИАМ» ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174

*Передовыми отечественными и зарубежными научными и производственными предприятиями и организациями проводятся исследования по разработке новых и совершенствованию серийно выпускаемых высокопрочных сталей, направленные на повышение прочности, вязкости, коррозионной стойкости. При этом особое внимание уделяется снижению стоимости производимых полуфабрикатов и повышению технологичности при изготовлении деталей.*

*В настоящее время основные усилия разработчиков новых сталей направлены на решение следующих задач:*

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

– создание высокопрочных коррозионностойких свариваемых сталей, в том числе со сверхравновесным содержанием азота, обладающих высокими значениями прочности, вязкости и выносливости.

**Ключевые слова:** высокопрочные стали, химико-термическая обработка, коррозионная стойкость, твердость.

V.I. Gromov, N.M. Voznesenskaya, N.G. Pokrovskaya, O.A. Tonysheva

### **High-strength constructional and corrosion-resistant steels developed by VIAM for aviation engineering**

*The advanced domestic and foreign scientific and manufacturing enterprises carry out researches on creation of new high-strength steels and improvement of commercial high-strength steels, which are aimed at increase of strength, viscosity and corrosion resistance. The special attention is paid to cost reduction of semi-finished products and technological effectiveness increase when manufacturing the parts.*

*Now the main efforts of developers of new steels are directed to the solution of the following tasks:*

– creation of new high-strength constructional steels, including steels which are strengthened by vacuum and ion-vacuum chemical thermal processing, allowing to raise the characteristic of endurance and strength of materials;

---

<sup>1</sup> Федеральное 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

– *creation of high-strength corrosion-resistant welded steels, including steels with the superequilibrium nitrogen content possessing high values of strength, viscosity and endurance.*

**Keywords:** *high-strength steels, chemical and thermal processing, corrosion resistance, hardness.*

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 8.2. «Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие свариваемые стали с высокой вязкостью разрушения» и 8.3. «Высокопрочные наноструктурируемые конструкционные стали и диффузионные покрытия, получаемые методами химико-термической обработки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1]. В соответствии с этими стратегическими направлениями исследования ФГУП «ВИАМ» направлены на создание конструкционных и коррозионностойких сталей, обладающих высокими значениями выносливости и прочности [2, 3].

### Высокопрочные конструкционные стали

К настоящему времени наиболее применяемыми в отечественной авиационной технике являются отечественные высокопрочные конструкционные стали, в том числе цементуемые, разработанные во ФГУП «ВИАМ», статическая прочность которых составляет до 1300 МПа при твердости цементованного слоя  $\geq 60$  HRC.

Совершенствование технологии производства деталей авиационной техники, в первую очередь газотурбинных двигателей (ГТД), – одна из важнейших задач современного машиностроения. Актуальность ее решения возрастает в связи с разработкой ГТД нового поколения, для которых характерен значительный рост силовой и тепловой напряженности всех деталей конструкции. Для решения поставленной задачи необходима разработка новых высокоэффективных процессов химико-термической обработки (ХТО). Наиболее перспективными методами ХТО в настоящее время признаны вакуумные и ионно-плазменные способы упрочнения поверхности деталей.

Разработанная во ФГУП «ВИАМ» цементуемая дисперсионно-твердеющая сталь ВКС-10У-Ш (модификация стали ВКС-10) после вакуумной цементации обеспечивает теплопрочность до 450–500°C и твердость цементуемой поверхности  $> 60$  HRC (табл. 1).

Таблица 1

**Механические свойства сталей ВКС-5-Ш и ВКС-10У-Ш**

Сталь	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$\psi$	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	HRC
	МПа		%			
ВКС-5-Ш	1300–1400	1150–1250	10–13	50–60	–	$\geq 60$
ВКС-10У-Ш	1360–1370	1160–1170	16–17	63–64	135	61–62

Преимущество вакуумной и ионно-плазменной химико-термической обработки перед традиционными газовыми процессами ХТО заключается в следующем:

- сокращение времени ХТО благодаря более интенсивному насыщению поверхности деталей;
- отсутствие окисления поверхности деталей, что исключает операции механической обработки по удалению дефектных оксидных слоев;
- возможность использования газовой закалки взамен закалки в масле для снижения коробления деталей;
- уменьшение расхода насыщающих сред – от нескольких раз до нескольких десятков раз;
- сокращение затрат на обеспечение экологической безопасности и промышленной санитарии в виду отсутствия опасных промышленных стоков и выбросов;
- полная компьютеризация проведения технологических процессов ХТО с целью обеспечения повторяемости результатов обработки и тем самым исключение повторных операций ХТО;
- легкая встраиваемость технологического оборудования в автоматизированный цикл термической и химико-термической обработки деталей, исключение затрат на организацию дополнительных рабочих мест операторов вплоть до создания «безлюдных» технологий;
- сокращение затрат на доводочные операции механической обработки деталей (хонингование, шлифование), достигаемое за счет уменьшения припусков на коробление деталей (до нескольких раз в зависимости от вида деталей).

В последнее время особое внимание уделяется разработкам процессов вакуумной цементации – как одним из наиболее перспективных технологических процессов ХТО.

Вакуумную цементацию деталей обычно проводят в специализированных установках или вакуумных печах, имеющих опцию вакуумной ХТО при температурах 900–1050°С, в среде газообразных углеводородов (ацетилен, этилен или др.). Общее время цементации определяется получением необходимой толщины цементованного слоя.

Газовая среда (ацетилен) подается в рабочую камеру установки циклически, что позволяет достичь необходимой концентрации углерода на поверхности детали. С помощью оборудования для вакуумной цементации можно последовательно провести цементацию и закалку в газовой среде в одной рабочей камере.

В качестве закалочной среды применяют газообразный азот (реже – аргон или гелий) при давлении в закалочной вакуумной печи до 15 ат (1,5 МПа) и более. Конструкция вакуумной печи позволяет осуществлять

равномерный теплоотвод от закаливаемых деталей, снижая тем самым величину их коробления по сравнению с закалкой в масле. Использование газовой закалки более предпочтительно в случае сложной геометрической формы закаливаемых деталей. Немаловажно и то, что газовая закалка является «сухой» и не требует промывки деталей от загрязнений, как после масляной закалки.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны процессы, позволяющие получать толщину диффузионных слоев при вакуумной цементации деталей в пределах от 0,9 до 2,5 мм, достигая значений твердости цементованной поверхности  $>60$  HRC.

Микроструктура цементованного слоя стали мартенситного класса после вакуумной цементации и полного цикла упрочняющей обработки (высокий отпуск, закалка, обработка холодом, низкий отпуск) представляет собой мартенсит и карбиды.

За последние десятилетия во многих развитых странах мира, таких как США, Германия, Франция, Япония, разработаны и применяются высокопрочные теплостойкие стали, имеющие предел прочности  $\sigma_b = 1600\text{--}1800$  МПа и теплопрочность после ХТО — до  $430^\circ\text{C}$ . Типичным представителем этих материалов является сталь AerMet 100, имеющая теплостойкость до  $430^\circ\text{C}$  и обеспечивающая твердость цементованной поверхности  $\geq 58$  HRC, при прочности сердцевины  $\sigma_b \geq 1800$  МПа.

С целью повышения прочности при сохранении теплостойкости и поверхностной твердости после ХТО, во ФГУП «ВИАМ» разработана высокопрочная дисперсионно-твердеющая сталь, микролегированная редкоземельными металлами (РЗМ) — Y, Ce, La.

При разработке химического состава стали исследовали сочетания карбидообразующих элементов (хром и молибден), которые препятствуют коагуляции цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) при вторичном твердении и образуют собственные мелкодисперсные фазы ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Me}_7\text{C}_3$ ), приводящие к повышению прочности.

Для получения высокой прочности и твердости основного металла и цементованного слоя подобран фазовый состав стали таким образом, чтобы после закалки количество остаточного аустенита не превышало 10–15%, который после нагрева до температур вторичного твердения претерпевает при охлаждении мартенситное превращение с образованием большого количества высокодисперсных карбидов ( $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Me}_6\text{C}$ ) [4]. Этой стали присвоена марка 26Х4М3Н7К9ВФАБч-ВИ (ВКС-15-ВИ).

Разработана технология вакуумной цементации стали ВКС-15-ВИ с обеспечением твердости поверхности — до 60 HRC. Необходимо отметить, что содержащийся в составе стали кобальт значительно ускоряет скорость диффузии углерода, тем самым сокращает время формирования цементованного слоя.

Результаты проведенных испытаний показали, что разработанная сталь, технологии производства из нее полуфабрикатов, технологии термической и химико-термической обработки обеспечивают уровень теплопрочности  $500^{\circ}\text{C}$ , предел прочности  $\sigma_b = 1935\text{--}1947$  МПа, превосходящие уровень соответствующих характеристик зарубежного аналога – стали AerMet100 при значительно меньшем (на 40–45%) содержании дорогостоящих легирующих элементов – Ni и Co. Разработанная сталь после упрочняющей термической обработки имеет мелкозернистую структуру отпущенного мартенсита с твердостью 54–56 HRC.

Микроструктура цементованного слоя после упрочняющей термической обработки представляет собой отпущенный мартенсит, остаточный аустенит (~10%), избыточные карбиды в приповерхностной части слоя в виде разорванной сетки по границе зерна на глубину 0,3–0,4 мм и мелкодисперсные специальные карбиды тугоплавких элементов, выделившихся при дисперсионном твердении. Твердость слоя составляет 59–60 HRC.

Сталь ВКС-15-ВИ может быть рекомендована к применению для высоконагруженных зубчатых колес редукторов авиационной техники, работающих длительно в среде масла при температурах до  $300^{\circ}\text{C}$  и кратковременно – до  $500^{\circ}\text{C}$  (в зоне контакта), а также изделий предприятий общего машиностроения.

В современном авиастроении большое внимание уделяется высокопрочным сталям [5].

Для изготовления крупногабаритных деталей шасси (балок тележек шасси, основных опор) применяется высокопрочная среднелегированная конструкционная сталь ВКС-9-ИД (35ХС2Н3М1ФА-ИД), упрочняемая до  $\sigma_b = 1910\text{--}1950$  МПа и работоспособная в температурном интервале – от  $-70$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ . Сталь наряду с высокой прочностью обладает высокими характеристиками вязкости, пластичности, сопротивления коррозионному растрескиванию и усталости. Сталь освоена металлургической промышленностью и нашла применение в изделиях филиала ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого».

В зарубежном авиастроении для крупных полуфабрикатов широко применяется аналогичная по своему назначению сталь марки 300М, использование которой предполагается в изделии МС-21.

В рамках работ по импортозамещению в 2015–2016 гг. во ФГУП «ВИАМ» проведены научно-исследовательские работы по созданию технологии изготовления крупногабаритных полуфабрикатов (поковок) из высокопрочной конструкционной стали ВКС-9-ИД с обеспечением уровня прочности  $>1950$  МПа для деталей шасси взамен импортной стали марки 300М (табл. 2).

Таблица 2

**Механические свойства (не менее) крупногабаритных полуфабрикатов (сечение 300–350 мм) из сталей ВКС-9-ИД и 300М**

Сталь	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
	МПа				
300М	1930	1586	65	25	22
ВКС-9-ИД	1950	1580	90	25	25

Для получения на крупногабаритных полуфабрикатах сечением 300–350 мм уровня прочности  $\sigma_b \geq 1950$  МПа и относительного сужения  $\psi \geq 25\%$  проведена корректировка состава высокопрочной стали ВКС-9-ИД, отработаны режимы изготовления полуфабрикатов, технология выплавки, горячей деформации и термической обработки поковки.

Разработка технологий изготовления крупногабаритных полуфабрикатов (поковок) из высокопрочной конструкционной стали ВКС-9-ИД с обеспечением уровня прочности  $>1950$  МПа позволяет использовать сталь для деталей шасси взамен импортной стали марки 300М.

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» высокопрочные конструкционные безуглеродистые мартенситостареющие стали марок ВКС-170 и ВКС-180, системы легирования Fe–18Ni–9Co–Mo–Ti с уровнем прочности  $\sigma_b$  от 1570 до 1800 МПа обладают уникальным сочетанием физико-механических свойств: наряду с высокими прочностными характеристиками ( $\sigma_{\text{пл}}$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ) они имеют высокие вязкость, пластичность, сопротивление усталости и коррозионно-водородному растрескиванию, обладают высокой теплопрочностью и низкой хладноломкостью.

Высокая вязкость и пластичность сталей обусловлена легированием большим количеством никеля (~18%), кобальта (~8–9%) при минимальном содержании углерода ( $\leq 0,03\%$ ), азота, марганца ( $< 0,1\%$ ), кремния ( $< 0,1\%$ ), серы и фосфора [6].

Стали данной системы легирования обладают неограниченной прокаливаемостью и высокой технологичностью при изготовлении деталей – не требуют предварительного отжига, в закаленном состоянии имеют твердость 24–32 HRC, что позволяет проводить различные виды холодной обработки давлением (раскатку, высадку, накатку резьбы) и без затруднений проводить механическую обработку резанием.

Упрочняющая обработка (старение) мартенситостареющих сталей проводится при температурах  $\sim 500^\circ\text{C}$  за счет выделения из безуглеродистой мартенситной матрицы высокодисперсных интерметаллидов – преимущественно Ni<sub>3</sub>Ti. При этом изменение размеров деталей минимально, не возникает поводок и короблений, обычных для среднелегированных сталей, которые упрочняются закалкой с высоких температур.

При металлургическом производстве мартенситостареющих сталей применяют методы выплавки, направленные на максимально возможное снижение в металле газонасыщенности, количества неметаллических включений и улучшения состояния границ зерен. С этой целью при выплавке используют чистые шихтовые материалы, дуплекс-вакуумные способы выплавки – например, выплавку в вакуумно-индукционных печах с последующим вакуумно-дуговым (ИД) или электронно-лучевым переплавом (ИЛ) [7]. Выплавка и изготовление различных полуфабрикатов (прутков, поковок) из этих сталей освоены отечественной металлургической промышленностью.

Проведенные исследования характеристик длительной прочности и ползучести мартенситостареющих безуглеродистых сталей показали, что их можно рассматривать как перспективный материал для авиационных двигателей (валов ГТД), работающих при температурах до 400–450°С. В табл. 3 представлен комплекс свойств сталей ВКС-170 и ВКС-180 в сравнении с традиционно применяемыми для валов ГТД теплопрочными хромистыми сталями мартенситного класса ЭП517 и ЭИ961 [8].

Таблица 3

**Сравнительные свойства (не менее) сталей  
ВКС-170, ВКС-180, ЭП517 и ЭИ961**

Сталь	Температура испытаний, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_b$	$\sigma_{-1}$ , при $N=2 \cdot 10^7$ циклов	$\sigma'_{100}$	$\sigma'_{0,2/100}$
ВКС-170	20	1520	1570	660*	–	–
	400	1200	1330	490*	1100	800
	450	1100	1230	–	780	460
ВКС-180	20	1610	1720	650	–	–
	400	1250	1380	510	1120	800
	450	1200	1300	–	800	470
ЭП517	20	950	1100	550	–	–
	400	800	850	490	880	500
	450	770	800	–	780	–
ЭИ961	20	950	1100	520*	–	–
	400	850	950	–	770	550
	450	800	930	–	710	–

\* При  $N=10^7$  циклов.

Стали ВКС-170 и ВКС-180 превосходят стали ЭП517 и ЭИ961 по прочностным характеристикам ( $\sigma_b^{400^\circ}$ ) – до ~30% и выносливости ( $\sigma_{-1}$ ) – до ~20%, не уступая им по длительной прочности и ползучести.

Использование мартенситостареющих сталей позволяет значительно повысить весовую эффективность и долговечность валов ГТД. Сталь ВКС-170 применяется для изготовления валов ГТД двигателя ПД-14, а

сталь ВКС-180 нашла использование для вала ГНД перспективного вертолетного двигателя.

В России для изготовления авиационных подшипников используется сталь ШХ-15, а для теплостойких подшипников – сталь 8Х4В9Ф2-Ш (ЭИ347) [9]. Сталь ЭИ347 обладает высокой прочностью и теплостойкостью, однако структура этой стали может характеризоваться высокой карбидной неоднородностью, что крайне неблагоприятно для подшипников. Карбидная неоднородность может способствовать выкрашиванию рабочей поверхности подшипников, что снижает их долговечность.

В США для изготовления теплостойких подшипников широко применяется сталь марки М50, отличающаяся высокими прочностными свойствами и теплостойкостью, низкой карбидной неоднородностью.

Большой опыт в области разработки систем легирования и упрочнения конструкционных сталей позволил создать во ФГУП «ВИАМ» теплостойкую подшипниковую сталь 8Х5МЗВФБ-ВИ (ВКС241-ВИ), не уступающую стали М50 по эксплуатационным характеристикам и имеющую более благоприятную структуру по карбидной неоднородности по сравнению со сталью ЭИ347.

Разработанная сталь ВКС241-ВИ содержит значительно меньшее количество легирующих элементов (вольфрама и молибдена) по сравнению со сталями-аналогами – ЭИ347 и М50.

Проведенные во ФГУП «ВИАМ» научно-исследовательские работы позволили разработать технологию вакуумно-индукционной выплавки и горячей деформации стали с обеспечением теплостойкости не ниже 500°С при твердости НRC не менее 60, с однородной структурой без выделения грубых карбидов. Упрочнение стали обеспечивается за счет высокодисперсных карбидов типа  $Fe_3Me_3C$ ,  $Cr_7C_3$  и  $NbC$ .

По результатам определения температур фазовых превращений, фазового состава и исследования свойств разработана энергосберегающая технология упрочняющей термической обработки (выбраны оптимальные температуры нагрева под закалку и дальнейшего отпуска) стали ВКС241-ВИ.

По технологичности новая сталь отличается от стали ЭИ347 снижением трудоемкости при горячей пластической деформации, отжиге, более низкой температурой нагрева под закалку. По равномерности структуры новая сталь превосходит сталь ЭИ347, что обеспечивает повышение контактной долговечности подшипников авиационных двигателей.

Во ФГУП «ВИАМ» совместно с АО «Металлургический завод «Электросталь» исследованы и отработаны технологические параметры выплавки вакуумно-дуговым переплавом и горячей пластической деформации стали ВКС241-ВИ в условиях металлургического производства.



Совместно ФГУП «ВИАМ» и ОАО «ЕПК Самара» выполнена работа, в результате которой отработаны технологические параметры упрочняющей термической обработки, при которой достигаются высокие показатели предела прочности  $\sigma_b = 2426\text{--}2661$  МПа, твердости 61–61,5 HRC и теплостойкости – до 500°C.

В условиях ОАО «ЕПК Самара» при технологическом сопровождении ФГУП «ВИАМ» изготовлена опытно-промышленная партия подшипников и исследовано их качество.

Исследования показали, что твердость подшипников составляет для колец подшипников 62–62,5 HRC, для шариков 63,5–64 HRC. Установлено, что в результате проведенной термической обработки сформирована структура отпущенного мартенсита с равномерно выделившимися в нем дисперсными карбидами.

В ОАО «ЕПК Самара» проведены стендовые испытания подшипников из стали ВКС241-ВИ, в результате которых установлено, что все подшипники отработали на стенде установленный ресурс без замечаний, находятся в удовлетворительном состоянии и могут быть рекомендованы для применения в изделиях авиационной техники.

### **Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые стали, в том числе со сверхравновесным содержанием азота**

В условиях работы в коррозионной среде, например во влажном морском климате, необходимы материалы, обладающие высокой коррозионной стойкостью. В авиации к коррозионностойким сталям предъявляют широкий ряд требований: высокие прочность, сопротивление повторным нагрузкам, стойкость к коррозионному растрескиванию и одновременно пластичность и вязкость [10].

Перспективными являются коррозионностойкие хромоникелевые стали мартенситного и переходного 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, а также позволяет достичь более высоких значений пластичности и вязкости, которые не достижимы на сталях, легированных только углеродом.

Выплавка азотсодержащих сталей сопряжена с некоторыми трудностями, возникающими вследствие снижающейся растворимости азота при кристаллизации слитка и образования газовых пузырей и пористости. Увеличению растворимости азота способствует легирование элементами, обладающими большим сродством к азоту – хромом, марганцем, титаном, алюминием, ванадием.

Наиболее простой способ получения бездефектных слитков азотсодержащих сталей — это выплавка в открытых индукционных или дуговых печах под атмосферным давлением. В этом случае коррозионностойкие стали мартенситного и аустенито-мартенситного (переходного) классов могут содержать азот — до 0,10% (по массе); у коррозионностойких аустенитных сталей, в которых количество хрома может достигать до 20–22% (по массе) и марганца — до 10% (по массе), содержание азота можно увеличить до 0,5–0,6% (по массе).

Подбирая фазовый состав стали мартенситного и аустенито-мартенситного класса открытой выплавки, в котором присутствует определенное количество остаточного аустенита, имеющего большую растворимость азота (по сравнению с мартенситом), можно при сохранении требуемого уровня прочности ввести повышенное количество азота (>0,10% (по массе)).

Одной из сталей с повышенным содержанием азота (0,12–0,13% (по массе)) является высокопрочная коррозионностойкая экономнолегированная сталь ВНС-74 (05X16H5AB) мартенситного класса [11], содержащая 35–40% остаточного аустенита в литом состоянии, 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 [12]. Процесс холодной высадки зависит от многих факторов, основными из которых являются пластичность материала, подвергаемого деформации, химический состав, механические свойства, величина зерна [13].

В настоящее время методом холодной высадки можно получить крепеж из высокопрочной коррозионностойкой стали СН-2А (07X16H6) с характеристиками прочности:  $\sigma_b = 1177$  МПа и  $\tau_{cp} = 686$  МПа. Сталь ВНС-74, разработанная для изготовления высадного крепежа, получаемого холодной деформацией, обладает более высокими прочностными характеристиками (табл. 4) 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 перекосу 6 град. Сталь ВНС-74 рекомендуется для эксплуатации при температурах от -70 до +200°С во всеклиматических условиях.

Таблица 4

**Сравнительные свойства экономнолегированной стали  
ВНС-74 и стали СН-2А**

Свойства	Значения свойств для стали	
	ВНС-74	СН-2А
Содержание углерода/азота, % (по массе)	(0,03–0,07)/(0,12–0,14)	0,07/–
$\sigma_B$ , МПа	1400	1177
$\sigma_{0,2}$ , МПа	1200	880
$\tau_{ср}$ , МПа	950	686
$\sigma_{-1}$ , МПа (при $N=10^7$ циклов)	730	540
Разрушающая нагрузка для болтов М8, Н:		
при разрыве	53900	36554
при срезе	46305	33722

Более высокой прочностью  $\sigma_B \geq 1750$  МПа обладает разработанная во ФГУП «ВИАМ» коррозионнотойкая экономнолегированная сталь ВНС-72 (15X14N4ГAM) [14], с повышенным содержанием азота – до 0,14–0,15% (по массе), которая отличается помимо высоких прочностных параметров высокими пластичностью, выносливостью и трещиностойкостью [15]. Сталь принадлежит к переходному (аустенито-мартенситному) классу, упрочняется за счет суммарного содержания азота и углерода ~0,30% (по массе).

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 за счет формирования 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 более 1 года [16].

Несмотря на повышенное содержание азота, сталь ВНС-72 хорошо сваривается аргоно-дуговой сваркой с присадкой, имеет удовлетворительные значения ударной вязкости как при комнатной, так и при отрицательных температурах в состоянии «сварка+термообработка» [17]:

– присадка 08X14N7KBM-ВИ –  $KCV_{шов}^{+20^\circ} = 76,5$  Дж/см<sup>2</sup>,  $KCV_{шов}^{-70^\circ} = 74$  Дж/см<sup>2</sup>,  
 $KCV_{линия\ сплавления}^{+20^\circ} = 95$  Дж/см<sup>2</sup>;

– присадка ВНС-72 –  $KCV_{шов}^{+20^\circ} = 60$  Дж/см<sup>2</sup>,  $KCV_{шов}^{-70^\circ} = 50$  Дж/см<sup>2</sup>,  $KCV_{линия\ сплавления}^{+20^\circ} = 90$  Дж/см<sup>2</sup>.

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. 5.

Таблица 5

**Сравнительные свойства сталей ВНС-72, ВНС-5 и ВНС-43**

Свойства	Значения свойств для стали		
	ВНС-72	ВНС-5	ВНС-43
Содержание углерода/азота, % (по массе)	(0,14–0,16)/(0,14–0,16)	(0,11–0,16)/(0,05–0,10)	(0,16–0,21)/(0,04–0,09)
$\sigma_B$ , МПа	1750	1470	1570
$\sigma_{0,2}$ , МПа	1350	1200	1225
KCV, Дж/см <sup>2</sup> ( $r_H=0,25$ мм)	80	90	70
СРТУ: $d//dN$ , мм/цикл (при $\Delta K=31$ МПа)	0,22	0,30	0,25
$K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$	145	175	130
МЦУ: $\sigma_{max}$ , МПа (при $N=2 \cdot 10^5$ циклов; $K_f=2,2$ )	700	490	500
$\sigma_{в,св}$ , МПа (ЭЛС+термообработка)	1600	1400	1600

В ряде случаев проведение термической обработки сложных крупногабаритных сварных конструкций с большим перепадом сечения весьма проблематично. Для решения этой проблемы создана высокопрочная коррозионностойкая сталь ВНС-73 (10X13H4K4M3C2A) [18], не требующая обязательной термической обработки после сварки.

Химический состав стали ВНС-73 разработан на базе химического состава широко применяемой стали ЭП817 (06X14H6Д2МБТ) аналогичного назначения. Однако 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. 6). 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 аргоно-дуговой сваркой (АрДЭС) с присадкой и без присадки, после сварки не требует обязательной термообработки.

Коррозионностойкая сталь 23X15H5AM3-Ш (ВНС-9-Ш), разработанная во ФГУП «ВИАМ», применяется для изготовления пластин торсионов вертолетов Ка-226, Ка-62, Ка-52, Ми-26, Ми-28 Ми-34, Ми-38, а также пластинчатых муфт привода основного винта вертолетов Ми-26, Ми-28, Ми-34, Ми-38.

В 2012 г. единственным поставщиком холоднокатаной ленты из сплава 23X15H5AM3-Ш (ВНС-9-Ш) являлось ОАО ММЗ «Серп и молот».

Однако у предприятий производителей вертолетной техники имелись серьезные претензии к качеству поставляемой ленты, что объяснялось физическим и моральным износом технологического оборудования для производства ленты.

Таблица 6

**Сравнительные свойства высокопрочных коррозионностойких сталей мартенситного класса ВНС-73 и ЭП817**

Свойства	Значения свойств для стали	
	ВНС-73	ЭП817
Содержание углерода/азота, % (по массе)	(0,08–0,12)/(0,05–0,10)	(0,05–0,08)/–
$\sigma_{в}$ , МПа	$\geq 1375$	$\geq 1225$
$\sigma_{0,2}$ , МПа	1200	930
$\delta_5$ , %	15	15
$\Psi_2$ , %	55	55
КСТ, Дж/см <sup>2</sup>	65	70
$K_{1с}$ , МПа $\sqrt{м}$	145	175
МЦУ: $\sigma_{max}$ , МПа (при $N=2 \cdot 10^5$ циклов; $K_T=2,2$ )	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 ( $\sigma=980$ МПа)* в КСТ-35 в течение $\tau_{разр.св}$ , мес	$>6$ (без разрушения)	$>6$ (без разрушения)

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

Снижение качества ленты привело к тому, что срок службы пластин торсионов снизился до 20–30% от назначенного ресурса.

Сложившаяся ситуация привела к невозможности обеспечить безопасную эксплуатацию существующих вертолетов и сдерживала разработку перспективных образцов вертолетной техники гражданского и военного назначения.

С учетом технических возможностей и оснащенности ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (ПАО «ЧМК»), а также научных и технологических разработок ФГУП «ВИАМ» и других отраслевых институтов, было принято решение о разработке и внедрении на ПАО «ЧМК» технологии изготовления холоднокатаной нагартованной ленты из стали аустенито-мартенситного класса 23X15H5AM3-Ш (ВНС-9-Ш), соответствующей требованиям ГОСТ 4986–79 и ТУ14-1-4126–86 [19].

Особенностью стали 23X15H5AM3-Ш (ВНС-9-Ш) является то, что после термической обработки сталь имеет метастабильную структуру аустенита, который претерпевает мартенситное превращение при холодной деформации, что, в свою очередь, обеспечивает высокий уровень механических свойств и позволяет изготавливать из этой стали высоконагруженные детали вертолетов, такие как торсионы и пластинчатые муфты привода винтов.

В процессе разработки всесторонне исследованы режимы выплавки, горячего и холодного деформирования (прокатки), термической обработки полуфабрикатов для изготовления ленты. В частности, выплавку стали ВНС-9-Ш проводили с регламентацией содержания легирующих элементов и получением необходимого фазового состава, для чего процесс выплавки металла проводили с контролем намагниченности литых проб и доводкой фазового состава по результатам контроля намагниченности. Оптимальные температуры горячего деформирования (прокатки) определяли по результатам испытания пластичности металла на комплексе физического моделирования и пластомере.

Необходимо отметить, что разработанная технология позволяет исключить при производстве ленты из стали ВНС-9-Ш дорогостоящее специализированное оборудование – печи с нагревом в защитной атмосфере. Термическую обработку проводили в закалочной-травильных агрегатах, оснащенных печами с воздушной атмосферой, а обезуглероженный слой удаляли с помощью электролитического травления, а также промежуточной зачисткой рулонного проката в агрегатах сплошной зачистки.

Детали из холоднокатаной нагартованной ленты из стали аустенито-мартенситного класса 23X15H5AM3-Ш (ВНС-9-Ш), изготовленной по разработанной технологии, успешно прошли испытания.

Все более широкое применение в мире в различных отраслях промышленности находят стали со сверхравновесным содержанием азота. Такие стали требуют специальных методов выплавки – например, в печах с избыточным давлением. В России во ФГУП «ВИАМ» впервые изготовлена и введена в эксплуатацию печь электрошлакового переплава под давлением ДЭШП-0,1 полупромышленного типа [20] и проводятся работы по разработке составов высокоазотистых сталей и технологий их производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ 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.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для

- авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
4. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1978. 338 с.
  5. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиастроении // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2002. С. 180–191.
  6. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситостареющие стали. М.: Металлургия, 1970. 350 с.
  7. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2016).
  8. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
  9. Коросташевский Р.В., Зайцев А.М. Авиационные подшипники качения. М.: Оборонгиз, 1963. 340 с.
  10. 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: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 142–150.
  11. Высокопрочная коррозионностойкая сталь: пат. 2318068 Рос. Федерация; опубл. 21.11.05.
  12. Мокринский В.И. Производство болтов холодной объемной штамповкой. М.: Металлургия, 1978. 71 с.
  13. Мисожников В.М., Гринберг М.Я. Технология холодной высадки металла. М.: Машгиз, 1951. 310 с.
  14. Высокопрочная коррозионностойкая сталь и изделие, выполненное из нее: пат. 2214474 Рос. Федерация; опубл. 20.10.2003.
  15. Тонышева О.А., Вознесенская Н.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Исследование новой высокопрочной экономнолегированной азотосодержащей стали повышенной надежности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. №SP2. С. 17–20.
  16. 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.

17. 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.
18. Высокопрочная коррозионностойкая сталь мартенситного класса и изделие, выполненное из нее: пат. 2291912 Рос. Федерация; опубл. 10.11.05.
19. Вознесенская Н.М., Елисеев Э.А., Капитаненко Д.В., Тонышева О.А. Оптимизация технологических режимов получения тонких листов и ленты из коррозионностойкой стали ВНС-9Ш // Металлы. 2014. №1. С. 46–52.
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.-технич. журн. 2016. №5. Ст. 04 .URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-4-4.