

паток компрессора, вентилятора и других деталей ГТД, а также демпфирующих ионно-плазменных покрытий, предохраняющих от преждевременного разрушения ответственные детали ГТД. Разрабатываемые покрытия могут быть применены для защиты лопаток и других деталей перспективных ГТД 5-го и 6-го поколений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мубояджян С.А. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала // *Металлы*. 2008. № 2. С. 20–34.
2. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Ионно-плазменные нанослойные эрозионностойкие покрытия на основе карбидов и нитридов металлов // *Металлы*. 2010. № 5. С. 39–51.
3. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С., Журавлева П.Л. Исследование свойств нанослойных эрозионностойких покрытий на основе карбидов и нитридов металлов // *Металлы*. 2011. № 4. С. 91–101.

*Е.С. МАРКОВА, Н.Г. ПОКРОВСКАЯ,  
А.Б. ШАЛЬКЕВИЧ, В.И. ГРОМОВ*

## МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩИЕ СТАЛИ – НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВАЛОВ ГТД

Для деталей, в том числе валов, отечественных газотурбинных двигателей (ГТД) традиционно применяются жаропрочные коррозионностойкие стали мартенситного класса, такие как ЭИ961, ЭП517, ЭП866 с прочностью до 1200 МПа.

Актуальная задача снижения массы деталей двигателя путем повышения прочности этого класса сталей невыполнима, так как даже небольшое повышение прочности на 10–15% благодаря дополнительному легированию приводит к снижению вязкости разрушения и трещиностойкости материала.

Существенное повышение прочности материала валов может быть получено путем использования высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей системы легирования Fe–18Ni–Co–Mo–Ti.

Ранее в ВИАМ были проведены глубокие исследования и выполнен комплекс работ\* по созданию безуглеродистых ( $C \leq 0,03\%$ ) мартенситостареющих сталей, обладающих наряду с высокими прочностными свойствами также высокими вязкостью разрушения, пластичностью, сопротивлением повторно-статическим нагрузкам, коррозионному и водородному растрескиванию.

Стали указанной системы легирования характеризуются высокой технологичностью, обладают сквозной прокаливаемостью и в закаленном состоянии имеют структуру безуглеродистого мартенсита с невысокой твердостью (~24–32 HRC). Упрочнение происходит в области температур

\* Работы выполнены В.В. Сачковым, О.К. Ревякиной, Е.С. Каган и другими сотрудниками.

~500°C (с охлаждением на воздухе) за счет выделения из практически безуглеродистой мартенситной матрицы мелкодисперсных интерметаллидов типа  $Ni_3Ti$ . При таком механизме упрочнения практически отсутствуют поковки и коробление деталей, что в свою очередь позволяет из закаленных заготовок изготавливать практически готовые детали с небольшими припусками под чистовые размеры.

В исследованиях установлено, что для реализации в изделиях комплекса механических свойств и характеристик надежности данных сталей при их производстве необходимо применять дуплекс-вакуумные методы выплавки и специальные способы раскисления, обеспечивающие минимальное содержание углерода ( $C = 0,01-0,03\%$ ) и высокую чистоту металла по неметаллическим включениям (~1 балл по шкале ГОСТ 1778).

Для использования сталей применительно к крупногабаритным деталям (в том числе валов ГТД) необходимы специальные режимы термической обработки, обеспечивающие однородную и мелкозернистую структуру.

В течение последних лет для двигателя ПД-14 проведены исследования возможности применения для вала ТНД высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-170-ИД с  $\sigma_B \geq 1570$  МПа. Изготовлена партия поковок вала (масса поковки 480 кг, длина 2500 мм) и выполнены исследования физико-механических свойств при комнатной и рабочих температурах. Основные характеристики, полученные в работе, представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Механические свойства мартенситостареющей стали ВКС-170-ИД

$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\psi, \%$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	<sup>400°</sup> $\sigma_{100}$	<sup>450°</sup> $\sigma_{100}$	<sup>400°</sup> $\sigma_{0,2/100}$	<sup>450°</sup> $\sigma_{0,2/100}$
МПа			МПа				
1645	1585	60	70	1090	830	660	470

Полученные результаты комплексных исследований стали ВКС-170-ИД позволили рекомендовать ее для изготовления валов ТНД двигателя ПД-14.

Продолжая работы по повышению весового совершенства деталей, в том числе валов ТНД перспективных двигателей, разработана новая более прочная мартенситостареющая сталь ВКС-180 с прочностью  $\sigma_B \geq 1720$  МПа\*.

При разработке состава, технологии выплавки, режимов деформации и термообработки стали ВКС-180 авторами был использован накопленный опыт освоения сталей этого класса.

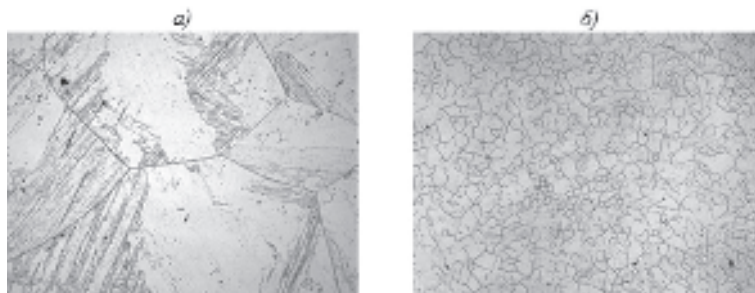
Для выплавки стали выбрана вакуумная индукционная плавка (ИД) на свежих шихтовых материалах с последующим вакуумным дуговым переплавом. В качестве раскислителей и модификаторов использовали магний (кальций), лантан и иттрий в количестве до 0,05% (по массе), что позволило обеспечить достаточно глубокое раскисление металла,

\* Работы выполнены Е.С. Марковой, Н.Г. Покровской.

сформировать преимущественно глобулярные неметаллические включения, уменьшить концентрацию вредных примесей в твердом растворе и улучшить состояние границ зерен.

На ОАО «Металлургический завод «Электросталь»» проведена выплавка и изготовлены кованные прутки (квадрат 90 и 150 мм) с предварительной осадкой на 30% и степенью укова не менее трех.

Для поковок валов был разработан режим термической обработки, обеспечивающий однородную мелкозернистую структуру с размером зерна ~7 балла (ГОСТ 5639). Микроструктура стали ВКС-180-ИД после соответствующих термообработок приведена на рисунке.



Микроструктура (а –  $\times 500$ ; б –  $\times 100$ ) стали ВКС-180-ИД в состоянии после закалки по режимам:

а – с  $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ , 1 ч (охлаждение в воде); б – с  $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ , 1 ч (охлаждение в воде) + 3 раза с  $940 \pm 10^\circ\text{C}$ , 1 ч (охлаждение в воде)

Выбор режима старения проводился по результатам измерения твердости. Установлено, что для обеспечения уровня твердости (49,5–52) HRC, соответствующего прочности  $\sigma_B = 1720\text{--}1865$  МПа, необходима температура старения  $500\text{--}540^\circ\text{C}$  с выдержкой от 2 до 10 ч.

Исследования, проведенные на образцах, вырезанных из квадратов 90 и 150 мм в продольном и поперечном направлениях, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства стали ВКС-180-ИД (квадрат 90 и 150 мм)

Направление вырезки образца	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
		МПа			
Пруток квадрат 90 мм					
Продольное	52	1886	1918	54	49
		1845	1877	52	54
Поперечное	52	1895	1915	48	45
		1877	1901	46	38
Пруток квадрат 150 мм					
Продольное	51,5–52	1852	1874	54	51
		1889	1939	54	52
Поперечное	51,5–52	1874	1918	48,5	39
		1877	1922	48,5	37

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
$\sigma_B$ , МПа		1770	1810
$\psi$ , %		60	58
КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	+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 ( $\psi$ ) и вязкость разрушения (КСУ) 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