УДК 669.018.292

В.И. Громов[1], Н.А. Якушева[1], А.В. Востриков[1], Н.Н. Черкашнева[2]

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ВАЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (обзор)

Вал двигателя ГТД является высоконагруженной деталью особо ответственного назначения, к нему предъявляются повышенные требования по сохранению уровня свойств при длительной эксплуатации, обеспечивающие конструктивную прочность изделия. Повышение ресурса и долговечности работы изделия достигается благодаря разработке новых материалов, превосходящих по своим механическим свойствам применяемые отечественные и зарубежные аналоги. Во ФГУП «ВИАМ» разработаны высокопрочные конструкционные стали с повышенными характеристиками прочности, ударной вязкости, долговечности и жаропрочности.

Ключевые слова: *высокопрочная сталь, вал, усталость, двигатель, механические свойства, предел прочности.*

V.I. Gromov[1], N.A. Yakusheva[1], A.V. Vostrikov[1], N.N. Cherkashneva[2]

HIGH STRENGTH STRUCTURAL STEELS FOR GAS-TURBINE ENGINE SHAFTS (review)

The motor shaft of a gas turbine engine, being a highly loaded part of a particularly critical purpose, has increased requirements for maintaining the level of properties during long-term operation, ensuring the structural strength of the product. An increase in the resource and durability of the product is achieved due to the development of new materials that surpass the used domestic and foreign analogues in their mechanical characteristics. FSUE «VIAM» has developed high-strength structural steels with enhanced characteristics of strength, toughness, durability and heat resistance.

Keywords: *high strength steel, shaft, fatigue, engine, mechanical properties, tensile strength.*

[1]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

[2]Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель» [Joint-Stock Company «UEC-Aviadvigatel»]; e-mail: office@avid.ru

Введение

Условия работы современной авиационной техники определяют повышенные требования к применяемым материалам: обеспечение высокой прочности конструкции при высокой надежности, длительности работы при воздействии знакопеременных нагрузок, сохранение свойств при пониженных и повышенных температурах эксплуатации [1].

Вал двигателя турбины низкого давления (ТНД) является основной особо ответственной деталью и предназначен для передачи крутящего момента с ротора ТНД на вал компрессора низкого давления, а также для передачи нагрузок, которые действуют на ротор ТНД.

Вал ТНД при работе испытывает большие знакопеременные нагрузки, основными из которых являются неравномерность распределения температуры по всему сечению изделия, контактные напряжения, передающиеся в местах крепления деталей с фланцем, а также крутящий момент и центробежные силы от вращения ротора.

В настоящее время конструкторами изделий рассматривается возможность уменьшения массы вала ТНД для снижения общей массы двигателя и, как следствие, увеличения его ресурсных характеристик. Применение в конструкции новых материалов, позволяющих при увеличении уровня механических характеристик существенно снизить массу деталей без потери долговечности работы, является приоритетной задачей [2]. При этом особое внимание уделяется снижению стоимости производимых полуфабрикатов и повышению технологичности при изготовлении деталей.

Рассматривая случаи разрушения валов серийного производства при эксплуатации двигателей, можно сделать вывод о том, что ~60% случаев разрушения носят усталостный характер, возникающий вследствие повышенных вибраций при работе двигателя и многократных запусков. В основном разрушение происходит при самом нагруженном режиме работы двигателя – взлетном, так как при данном режиме наблюдаются максимальные значения основных нагружающих факторов: температуры, крутящего момента и осевой силы. Поэтому при выборе материала для изготовления валов ТНД особое внимание уделяется характеристикам выносливости, жаропрочности и кратковременной прочности [3, 4].

В настоящее время в отечественном двигателестроении наибольшее распространение для валов ТНД получили теплопрочные мартенситные хромистые стали ЭИ961 (13Х11Н2В2МФ), ЭП517 (15Х12Н2МФВА-Б) и ЭП866 (15Х16К5Н2МВФАБ), работоспособные до температур 600–650 °С и термически обрабатываемые до прочности 900–1120 МПа. Химический состав и основные механические свойства приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав сталей ЭИ961, ЭП517 и ЭП866

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)											
	C	Cr	Ni	W	V	Mo	Si	Mn	N	Co	Nb	Fe
ЭИ961	0,10–0,16	10,5–12,0	1,5–1,8	1,6–2,0	0,18–0,30	0,35–0,50	≤0,6	≤0,6	–	–	–	Основа
ЭП517	0,13–0,18	11,0–12,5	1,7–2,1	0,65–1,0	0,18–0,30	1,35–1,65	≤0,6	≤0,6	0,02–0,08	–	–	Основа
ЭП866	0,13–0,18	15,0–16,5	1,7–2,1	0,65–1,0	0,18–0,30	1,35–1,65	≤0,6	≤0,6	0,03–0,08	4,5–5,5	0,20–0,35	Основа

Таблица 2

Механические характеристики хромистых мартенситных сталей (типичные значения)

Сталь	Температура испытания, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{пц}$	δ_5	ψ	*KCU*, Дж/см^2
		МПа			%		
ЭИ961	20	880	780	–	15	55	98
	500	580	540	–	15	70	115
	600	490	460	–	25	75	115
ЭП517	20	1030	830	580	14	56	55
	550	680	540	340	15	65	135
	600	540	390	245	16	70	–
	650	400	340	176	20	75	155
ЭП866	20	1030	830	640	12	45	55
	450	930	780	–	10	40	–
	550	735	670	390	15	60	–

В данных сталях упрочнение достигается за счет комплексного легирования хромом, никелем, ванадием, молибденом и вольфрамом и образованием карбидов типа $Me_{23}C_6$, легированных Cr, W, Fe, V, влияющих также на теплопрочность сталей.

Влияние температуры отпуска на свойства стали ЭИ961 приведено в табл. 3.

Таблица 3

Влияние температуры отпуска на механические свойства стали ЭИ961

Температура отпуска, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	*KCU*, Дж/см^2	HB ($d_{отп}$), мм
	МПа		%			
200	1520	1340	12	55	60	2,94
300	1480	1340	13	59	60	2,98
350	1480	1340	14	55	60	2,98
400	1500	1350	13	54	61	2,94
450	1510	1400	15	56	54	2,94
475	1540	1450	13	54	37	2,91
500	1350	1200	13	60	72	3,09
550	1250	1100	15	61	88	3,32
600	1100	900	15	61	105	3,47
650	900	750	16	63	108	3,71
700	880	720	17	64	120	3,83

Из представленных данных видно, что сталь сохраняет высокие прочностные характеристики и значения ударной вязкости до отпуска при температуре 450 °С. Повышение температуры отпуска до 475 °С приводит к снижению значений ударной вязкости стали. Это снижение значений ударной вязкости связано с тем, что при эксплуатации 9–12% хромистых сталей в интервале температур 450–500 °С наблюдается охрупчивание материала вследствие распада обогащенного хромом твердого раствора и образования зон, богатых и обедненных хромом. При этом, кроме фазы типа $Me_{23}C_6$, выделяющейся в основном по границам зерен, образуются также легированные высокохромистые комплексы. В дальнейшем с повышением температуры отпуска прочность снижается, а ударная вязкость повышается [5].

Для предотвращения резкого снижения значений ударной вязкости сталей, которые предназначены для работы при повышенных температурах, их подвергают отпуску при температурах, превышающих рабочие температуры эксплуатации изделия на несколько десятков градусов. При этом, в зависимости от температуры и продолжительности выдержки при отпуске, изменяются количество и состав карбидов $Me_{23}C_6$, а следовательно, и термическая стабильность основной фазы твердого раствора.

Усталостные характеристики и данные по длительной прочности сталей ЭП517 и ЭИ961 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики выносливости и длительной прочности сталей ЭИ961 и ЭП517

Сталь	Температура испытания, ° С	σ_{-1}, МПа (на базе $2\cdot10^7$ циклов)	$\sigma_\tau^{t^\circ}$, МПа (на базе 100 ч)
ЭП517	20 400	530 490	– 880
ЭИ961	20 400	520 450	– 880

Из приведенных данных видно, что применяемые в настоящее время в двигателестроении для валов ГТД мартенситные стали обладают высоким уровнем механических свойств, длительной прочности и сопротивления усталости.

Важное значение имеет трещиностойкость материала (особенно при повышенных температурах), обеспечивающая надежность работы изделия. Стали ЭИ961, ЭП517 и ЭП866 имеют тенденцию к снижению значений циклической трещиностойкости при дополнительных технологических нагревах вследствие изменения микроструктуры, что приводит также к снижению прочностных свойств и может явиться причиной преждевременного отказа узла двигателя.

Нарушения, которые могут быть связаны с отступлениями от технологического процесса производства валов (термическая обработка, механическая обработка и др.), могут сказаться на свойствах деталей при эксплуатации и привести к преждевременному разрушению изделия, особенно при повышенных температурах.

Для валов авиационных ГТД постоянно проводится поиск новых материалов, превосходящих по прочностным параметрам традиционно применяемые хромистые стали. Ранее высокопрочные стали с прочностью $\sigma_в \geq 1400$ МПа использовали только для силовых деталей планера и шасси, ресурс и условия работы которых во многом отличаются от работы деталей двигателя. Для безотказной работы валов ГТД кроме высоких характеристик прочности ($\sigma_{0,2}$ и $\sigma_в$), ударной вязкости и пластичности необходимо обеспечение высоких значений кратковременной и длительной прочности при повышенных температурах до 400–450 °С, в том числе и после длительных нагревов [6]. Особое внимание также уделяется характеристикам выносливости как при мало-, так и при многоцикловых условиях нагружения, коррозионной стойкости, обеспечивающих длительность и надежность эксплуатации двигателя.

Для достижения высокого комплекса физико-механических свойств особое внимание уделяется качеству металла: минимизации газонасыщенности, наличию примесей и неметаллических включений, типу упрочнения, размеру и виду упрочняющих фаз. Для получения более чистого металла как в России, так и за рубежом используются дуплекс-вакуумные методы выплавки и многократные переплавы, позволяющие изготовить материал с минимальным количеством примесей и неметаллических включений [7].

Среди материалов, работоспособных до температур 400–450 °С, могут рассматриваться мартенситные никелевые стали типа НР-9-4, сочетающие высокую прочность с высокой вязкостью разрушения. Фирмой Republic Steel [8] разработана серия среднелегированных (9% (по массе) Ni) конструкционных сталей типа НР-9-4 с содержанием углерода от 0,20 до 0,45% (по массе), термически упрочняемых до прочности от 1300 до 2060 МПа. Химический состав и механические свойства сталей приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Химический состав мартенситных никелевых сталей с 9% (по массе) Ni

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)							
	C	Co	Ni	V	Cr	Mo	Mn	Fe
НР-9-4-45	0,42–0,48	3,5–4,5	7–8,5	0,06–0,12	0,2–0,35	0,2–0,35	0,1–0,35	Основа
НР-9-4-30	0,29–0,34	4,25–5,0	7–8,0	0,06–0,12	0,9–1,0	0,9–1,0	–	Основа
НР-9-4-25	0,24–0,30	3,5–4,5	7–9,0	0,06–0,12	0,3–0,6	0,3–0,6	–	Основа

Таблица 6

Типичные механические свойства мартенситных никелевых сталей типа НР-9-4

Сталь (содержание С, % (по массе))	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$	HRC
	МПа		%			
НР-9-4-45 (0,45)	1910–2060	1650–1760	6–10	20–30	55–77	51
НР-9-4-30 (0,30)	1510–1640	1300–1375	12–16	50–60	110–130	44
НР-9-4-25 (0,25)	1330–1440	1215–1315	15–18	55–65	>150	42
НР-9-4-20 (0,20)	1300–1470	1230–1300	14–20	60–70	>150	42

Упрочнение этих сталей основано на карбидном упрочнении типа Fe_3C, Mo_2C и Me_7C_3. Данные стали сохраняют высокие значения вязкости разрушения вплоть до криогенных температур, высокую прочность до температур 500–550 °С и обладают высоким сопротивлением коррозионному растрескиванию и замедленному разрушению в коррозионно-активных средах, в том числе при наличии надреза.

Российским аналогом стали HP-9-4-30 является сталь ВКС-6 (32ХН8М1ФК5А), разработанная во ФГУП «ВИАМ» [9]. Физико-механические свойства стали ВКС-6 представлены в табл. 7.

Таблица 7

Средние значения механических свойств стали типа ВКС-6

Свойства	Значения свойств при температуре испытания, °С				
	-70	20	300	400	500
E, ГПа	191	191	162	153	140
$\sigma_{0,2}$, МПа	1470	1420	1180	1080	930
$\sigma_в$, МПа	1710	1570	1420	1245	1079
δ_5, %	10	12	10	10	8
ψ, %	50	55	60	60	65
KCU, Дж/см^2	50	70	–	–	–
K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$	77	108–1210			
$\sigma_{100}^{t^\circ}$, МПа	–	–	–	1175; 1079 (450 °С)	640

Сталь ВКС-6 рекомендуется к применению для высоконагруженных механически обрабатываемых деталей, работающих в общеклиматических условиях при температурах от -130 до +500 °С с антикоррозионной защитой. Сталь имеет высокие характеристики после воздействия нагревов до 450 °С в течение до 2000 ч и при 500 °С в течение 500 ч (табл. 8).

Таблица 8

Механические свойства стали ВКС-6 после воздействия нагревов

Свойства	Значения свойств				
	в исходном состоянии	при температуре и времени нагрева			
		450 °С			500 °С, 500 ч
		500 ч	1000 ч	2000 ч	
$\sigma_в$, МПа	1620	1620	1570	1370	1370
$\sigma_{0,2}$, МПа	1420	1540	1420	1250	1250
δ_5, %	12	13	13	14	14
ψ, %	58	60	60	64	64
KCU, Дж/см^2	58	49	558	58	78

По сравнению с низкоотпущенными сталями сталь ВКС-6 с карбидным упрочнением имеет высокие значения вязкости разрушения и обладает высоким сопротивлением замедленному разрушению и коррозионному растрескиванию (K_{1scc}=26 МПа$\sqrt{м}$). Надрезанные цилиндрические образцы из стали ВКС-6 с коэффициентом концентрации K_t=4 не разрушаются при напряжении 115–150 МПа в течение более чем 80 сут (1920 ч) их испытания даже при полном погружении в дистиллированную воду. В аналогичных условиях испытания образцы из стали 30ХГСН2А ($\sigma_в$=1600 МПа) разрушаются в течение 1–2 ч.

При проведении работ по сталям системы Ni–Co фирмой Carpenter Technology Corp. разработана ультравысокопрочная конструкционная мартенситная сталь марки AerMet с карбидным упрочнением, рекомендуемая для изготовления взлетно-посадочных устройств и валов реактивных двигателей. Химический состав стали AerMet100 представлен в табл. 9.

Таблица 9

Химический состав стали AerMet100

Содержание элементов, % (по массе)								
C	Co	Ni	Cr	Mo	Al	Si	Mn	Ti (max)
0,21–0,25	13–14	11–12	2,9–3,3	1,1–1,3	≤0,015	<0,01	<0,01	0,015

В отличие от сталей типа HP-9-4 и ВКС-6, в составе стали AerMet100 присутствует (в % (по массе)): до (11–12) Ni, (13–14) Co, ~3 Cr и (1,1–1,3) Mo, что обеспечивает упрочнение за счет дисперсионного карбидного упрочнения карбидами типа $(MoCr)_2C$ с получением прочностных свойств:

– при 20 °C – $\sigma_в \approx 1790$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 1740$ МПа, $\delta = 13\%$, $\psi \approx 60\%$;

– при 400 °C – $\sigma_в^{400^\circ} \approx 1600$ МПа, $\sigma_{0,2}^{400^\circ} \approx 1370$ МПа [10, 11].

Сложная технологичность изготовления, а также обезуглероживание и возможность появления закалочных трещин при нагреве привели к необходимости поиска новых материалов, имеющих высокие прочностные характеристики и способных работать при температурах 400–450 °C.

Наиболее известными материалами, работоспособными при температурах до 400–450 °C, являются высокопрочные конструкционные безуглеродистые мартенситостареющие стали системы легирования (состав – в % (по массе)) Fe–18Ni–8Co–5Mo–Ti [12, 13]. Закалка для этого класса сталей является смягчающей обработкой – значение твердости составляет 30–32 HRC. Упрочнение этих сталей достигается за счет дисперсионного твердения при температуре ~500 °C в результате выделения из безуглеродистой матрицы интерметаллидных фаз типа Ni_3Mo, Ni_3Ti и $Ni_3(TiMo)$, что позволяет избежать поводок и коробления при термической обработке деталей и минимизировать припуски под окончательную механическую обработку. Стали указанной системы легирования требуют антикоррозионной защиты.

Среди высокопрочных мартенситостареющих коррозионностойких сталей следует отметить сталь ВНС-17 (03Х11Н10М2Т, ЭП678), упрочняемую до предела прочности $\sigma_в$=1450–1600 МПа и работоспособную до температуры 400 °C. Достоинствами стали ВНС-17 является нечувствительность к жестким концентраторам напряжений, малая склонность как к коррозии под напряжением, так и к замедленному разрушению в воде.

Некоррозионностойкие мартенситостареющие стали ВКС-170 и ВКС-180 рекомендуются к применению для силовых деталей, работающих при температурах от -70 до +400 °C, во всеклиматических условиях с соответствующей защитой от коррозии.

В табл. 10 и 11 представлены механические свойства широко применяемых отечественных и зарубежных марок мартенситостареющих сталей.

Таблица 10

Прочностные свойства высокопрочных мартенситостареющих сталей системы легирования Fe–18Ni–8Co–5Mo–Ti (состав – в % (по массе))

Сталь	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$
	МПа (не менее)	
Maraging 200	1410	1440
ВКС-170 (ЭК21)	1520	1570
Maraging 250	1650	1700
ВКС-180 (ЭК186)	1610	1720

Таблица 11

Минимальные значения типичных механических свойств высокопрочных мартенситостареющих сталей в сравнении со свойствами сталей ЭИ961 и ЭП517

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств для сталей			
		ВКС-170	ВКС-180	ЭИ961	ЭП517
$\sigma_{0,2}$, МПа	20 400	1520 1200	1610 1300	930 830	930 880
$\sigma_в$, МПа	20 400	1570 1330	1720 1400	1080 930	1120 930
ψ, %	20 400	55 –	50 50	55 50	55 60
δ_5, %	20 400	10 –	10 12	13 10	13 11
*KC*U, Дж/см^2	20 400	55 60	50 –	60 –	58 –
*KC*V, Дж/см^2	20	–	35	–	–
K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$	20 -70	115 100	104–105 –	– –	– –
σ_{-1}, МПа (на базе $2\cdot10^7$ циклов, при K_t=1)	20 400	66–72 (N=10^7 циклов)	730 510	520 450	530 490
$\sigma_\tau^{t^\circ}$ (на базе 100 ч)	400 450	1050 800	1100 850	880 –	880 800
HRC	20	47–50	49,5–52	–	36–40

Особенностью данных марок сталей является присутствие титана, который при замедленном охлаждении с высоких температур создает с углеродом труднорастворимые карбиды типа TiC в виде сеток по границам исходных аустенитных зерен и снижает ударную вязкость и пластичность при изготовлении крупногабаритных деталей, таких как кронштейны, тяги, качалки и т. д. Для предотвращения этого явления во ФГУП «ВИАМ» разработаны специальные технологии термической обработки, обеспечивающие растворение карбонитридных фаз, измельчение зерна, достаточные прочность, ударную вязкость и пластичность [14].

Мартенситостареющие стали находят применение при изготовлении валов авиационных ТНД. В двигателе SaM146 (Франция) использована сталь Maraging 250, являющаяся аналогом стали ВКС-180. В конструкции ТНД двигателя GE-90, используемого для самолетов Boeing-777 и его модификаций, применена мартенситостареющая сталь, имеющая предел прочности $\sigma_в$=1840 МПа. В конструкции перспективного отечественного авиационного двигателя ПД-14 разработки АО «ОДК-Авиадвигатель» применена сталь ВКС-170-ИД (ЭК-21) с прочностью $\sigma_в \geq 1570$ МПа. Сталь ВКС-180-ИД с прочностью $\sigma_в \geq 1720$ МПа прошла металлургическое и технологическое освоение для валов вертолетных двигателей разработки АО «ОДК-Климов».

Среди зарубежных сталей, работоспособных до температур 400–450 °С, следует отметить сталь ML340 (X23NiCoCrMoAl13-6-3) разработки фирмы Aubert & Duval (Франция) [15] и сталь GE1014 (США) [16] с более высокими прочностными характеристиками (прочность – не менее 1960 МПа). Высокая прочность этих сталей достигается за счет двойного упрочнения: карбидного и интерметаллидного. Химический состав и типичные механические свойства этих сталей представлены в табл. 12 и 13.

Таблица 12

Химический состав сталей ML340 и GE1014

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)							
	C	Ni	Cr	Mo	Co	Al	V	Ti
ML340	0,23	13,0	3,3	1,50	5,80	1,50	0,25	–
GE1014	0,23	13,0	3,0	1,4	10,0	0,9–1,3	–	0,01 Σ(Nb, V, W)

Таблица 13

Типичные механические свойства сталей ML340 и GE1014

Сталь	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	*KV*, Дж	K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$	σ_{-1}, МПа (на базе 10^7 циклов)	$\sigma_в^{400°}$, МПа	δ	ψ
	МПа						%	
ML340	2200	1900	24	41	950	1700	10	50
GE1014	1950–2150	1900–2050	–	–	–	–	9–11	40–60

Стали данной системы легирования содержат до 0,3% (по массе) углерода и достаточное количество карбидообразующих элементов, таких как Cr, Mo, W и Al в количестве до 2% (по массе). Присутствие в стали алюминия при содержании никеля 10–18% (по массе) и кобальта 5–16% (по массе) позволяет получить высокую прочность наряду с высокими характеристиками пластичности. Вместе с карбидным упрочнением при старении происходит выделение интерметаллидных фаз типа β-NiAl. В сталях практически отсутствует титан, что позволяет избежать появления нитридов и карбонитридов титана, присутствующих в мартенситостареющих сталях, которые могут являться очагами усталостных разрушений.

Однако стали типа AerMet100, ML340 и GE1014 являются менее технологичными по сравнению с низкоуглеродистыми мартенситостареющими сталями. К недостаткам этих сталей можно отнести плохую отжигаемость, высокую твердость после закалки (40–43 HRC), обезуглероживание при нагреве под закалку и проведение обработки холодом при -70 °С. Поэтому при механической обработке необходимо использовать твердосплавный инструмент. При этом изготовление крупногабаритных длинномерных деталей типа валов не исключает поводки, коробления (вследствие наличия остаточного аустенита в стали после закалки) и появления закалочных трещин.

В настоящее время конструкторы ведут активный поиск отечественных материалов, к которым предъявляются повышенные требования по прочности, выносливости, пластичности и жаропрочности, для применения в конструкции двигателей самолетов. С этой целью для изготовления валов ГТД перспективных двигателей во ФГУП «ВИАМ» разработана новая высокопрочная конструкционная сталь с двойным упрочнением (карбидным и интерметаллидным), обеспечивающая высокий комплекс механических свойств: $\sigma_в^{20°} \geq 1960$ МПа, $\sigma_{-1}^{20°} = 780$ МПа (на базе $N=10^7$ циклов), $\sigma_{100}^{400°} = 1490$ МПа, $\sigma_{100}^{450°} = 1250$ МПа, $K_{1c} \geq 40$ МПа$\sqrt{м}$. По сравнению со сталями ВКС-170 ($\sigma_в \geq 1570$ МПа) и ВКС-180 ($\sigma_в \geq 1720$ МПа) разработанная сталь имеет более высокий уровень предела прочности при сохранении уровня значений характеристик вязкости разрушения и пластичности, а также не уступает по уровню этих свойств зарубежным аналогам – сплавам ML340 (Франция) и GE1014 (USA), применяемым для изготовления валов. Разработанная сталь рекомендуется для изготовления высоконагруженных силовых деталей ГТД, работающих при температурах до 450 °С с защитным покрытием.

Заключения

Проведен обзор высокопрочных конструкционных сталей отечественного и зарубежного производства, применяемых для валов авиационных ГТД, и их основных механических свойств.

Применение хромистых теплопрочных мартенситных сталей ЭИ961, ЭП517 и ЭП866 для изготовления авиационных валов, работающих при температурах 400–450 °С, ограничено их низкой прочностью $\sigma_в$=1080–1120 МПа и охрупчиванием в диапазоне рабочих температур.

Мартенситостареющие стали ВКС-170 и ВКС-180, разработанные во ФГУП «ВИАМ», с прочностью не менее 1570 и 1720 МПа соответственно могут использоваться в качестве перспективного материала для изготовления валов ТНД при температурах эксплуатации до 400 °С.

За рубежом для изготовления валов применяются стали типа ML340 и GE1014 с прочностью не менее 1950 МПа, достигаемой путем комплексной термической обработки и карбидного и интерметаллидного упрочнения.

Во ФГУП «ВИАМ» для перспективных двигателей большой тяги разработана новая высокопрочная конструкционная сталь, обеспечивающая высокий комплекс механических свойств: $\sigma_в^{20^\circ} \geq 1960$ МПа, $\sigma_{-1}^{20^\circ} = 780$ МПа (на базе $N=10^7$ циклов), $\sigma_{100}^{400^\circ} = 1490$ МПа, $\sigma_{100}^{450^\circ} = 1250$ МПа, $K_{1c} \geq 40$ МПа$\sqrt{м}$.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. №1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. Громов В.И., Курпякова Н.А., Коробова Е.Н., Седов О.В. Новая теплостойкая сталь для авиационных подшипников // Труды ВИАМ. 2019. №2 (74). Ст. 02. URL: http://www/viam-works.ru (дата обращения: 26.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23.
5. Братухин А.Г., Демченко О.Ф., Долженков Н.Н., Кривоногов Г.С. Высокопрочные коррозионностойкие стали современной авиации. М.: Изд-во МАИ, 2006. 401 с.
6. Громов В.И., Якушева Н.А., Полунов И.Л. Оценка влияния режимов термической обработки на уровень механических свойств мартенситостареющих сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al // Труды ВИАМ. 2017. №11 (59). Ст. 02. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 20.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-2-2.
7. Щербаков А.И., Крылов С.А., Калицев В.А., Игнатов В.А. Разработка технологии выплавки высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД (01Н18К9М5Т), микролегированной РЗМ // Труды ВИАМ. 2015. №2. Ст. 04. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 04.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-4-4.
8. Combining Strength and Fracture Toughness // Metal Progress. 1975. Vol. 107. No. 3. P. 52–53.
9. Гуляев А.П., Зикеев В.Н., Гусейнов Р.К. Влияние никеля и кобальта на свойства среднеуглеродистой высокопрочной стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 1975. №2. С. 2–5.

10. Novothy P., Maurer G. Ultra-High-Strehgth Steels VS Titanium Alloys // Advanced Materials & Processes. 2007. Vol. 165. No. 11. P. 37–40.
11. High strength, high fracture toughness structural alloy: pat. US5087415; filed 06.02.90; publ. 11.02.92.
12. Саморуков М.Л. Разработка методики испытания сварных соединений стали ВКС-180-ИД, полученных ротационной сваркой трением на статический угол изгиба // Труды ВИАМ. 2013. №6. Ст. 05. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 20.10.2020).
13. Высокопрочная мартенситностареющая сталь и изделие, выполненное из нее: пат. 2334017 Рос. Федерация; заявл. 05.12.06; опубл. 20.09.08.
14. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиастроении // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: ВИАМ, 2002. С. 180–190.
15. Закаленная мартенситная сталь, способ получения детали из этой стали и получаемая таким образом деталь: пат. RU2400557C2; заявл. 20.04.06; опубл. 27.09.10.
16. High strength, high fatigue structural steel: пат. US5393488A; filed 06.08.93; publ. 28.08.95.