



УДК 669.14+669.15-194.55

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА
МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ ВКС-180**

Е.С. Маркова

Н.А. Якушева

Н.Г. Покровская

А.Б. Шалькевич

кандидат технических наук

Июль 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№7, 2013 г.

*Е.С. Маркова, Н.А. Якушева, Н.Г. Покровская, А.Б. Шалькевич**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ ВКС-180

Рассмотрены технологические особенности мартенситостареющих сталей системы Ni–Co–Mo–Ti. Проведены исследования механических свойств стали ВКС-180, выплавленной электронно-лучевым переплавом, разработана энергоэффективная технология термической обработки.

Ключевые слова: *высокая прочность, вязкость, усталость, электронно-лучевой переплав, энергоэффективная технология.*

E.S. Markova, N.A. Yakusheva, N.G. Pokrovskaya, A.B. Shalkevich

TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE PRODUCTION OF MARAGING STEEL VKS-180

The technological features of maraging steels alloying system Ni–Co–Mo–Ti are discussed. Research shows the mechanical properties of steel VKS-180, smelted electron beam melting, energy-efficient technology developed by heat treatment.

Key words: *high strength, toughness, fatigue, electron beam melting, energy-efficient technology.*

Повышение весовой эффективности в сочетании с высокой надежностью материалов при разработке новых двигателей является актуальной задачей [1]. В отечественном авиационном моторостроении для изготовления валов газотурбинных двигателей используются хромсодержащие мартенситные стали ЭП517 и ЭП866 с прочностью ~1100 МПа.

В настоящее время ведется активный поиск новых высокотехнологичных материалов, обладающих более высокими прочностными характеристиками. Известно, что за рубежом для вала двигателя SAM 146 применяется мартенситостареющая сталь Maraging «250» (VascoMax–250) с прочностью ≥ 1700 МПа [2–4].

*В работе принимал участие к.т.н. А.И. Щербаков.

Для повышения весовой эффективности конструкций практический интерес для валов ГТД представляет использование высокопрочных конструкционных особо низкоуглеродистых мартенситостареющих сталей системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti с пределом прочности от 1570 до 1865 МПа [5, 6]. Низкое содержание углерода в этих сталях ($\leq 0,03\%$) и легирование их никелем и кобальтом обеспечивает получение высокопластичного мартенсита [7–9]. Старение в пластичной матрице позволяет получить оптимальное сочетание высоких прочностных и пластических свойств [10–12].

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). Упрочняющая обработка (старение) мартенситостареющих сталей проводится при относительно низких температурах ($\sim 450\text{--}500^\circ\text{C}$). Повышение прочности достигается благодаря выделению из безуглеродистой мартенситной матрицы высокодисперсных интерметаллидов Ni_3Ti . При этом изменение размеров минимально – не возникает поволоков и короблений, свойственных для среднелегированных сталей, которые упрочняются закалкой с высоких температур.

Мартенситостареющие стали системы Fe–18Ni–Co–Mo–Ti широко применяются для изготовления тяжелонагруженных деталей и узлов самолетов (шасси, осей, болтов крепления крыла и фюзеляжа, шестерен редукторов агрегатов управления самолетов, а также деталей орбитального космического корабля «Буран») [13, 14].

В качестве перспективного материала для изготовления валов двигателей может рассматриваться высокопрочная конструкционная мартенситостареющая сталь ВКС-180, разработанная в ВИАМ, упрочняемая на $\sigma_{\text{в}} \geq 1720$ МПа и обладающая хорошим сочетанием характеристик прочности, пластичности и надежности.

При металлургическом производстве мартенситостареющих сталей с пределом временного сопротивления разрушению >1600 МПа используют методы выплавки, направленные на максимально возможное снижение в металле газонасыщенности и количества неметаллических включений. С этой целью при выплавке используют чистовые шихтовые материалы; дуплекс-вакуумные способы выплавки: вакуумно-индукционная выплавка с последующим вакуумно-дуговым переплавом – (ВИ+ВДП)=ИД или вакуумно-индукционная выплавка с последующим электронно-лучевым переплавом – (ВИ+ЭЛП)=ИЛ; применяют специальные способы раскисления щелочными (Ca или Mg) и модифицирования редкоземельными (Ce, La, Y) металлами.

При снижении количества неметаллических включений и повышении их дисперсности существенно повышается пластичность и уменьшается анизотропия свойств высокопрочных сталей, что особенно важно для деталей, изготовленных из крупногабаритных заготовок [2, 15, 16].

Наиболее вредными по влиянию на свойства мартенситостареющих сталей системы Fe–18Ni–Co–Mo–Ti являются примеси углерода и азота [15], которые, обладая высоким химическим сродством к титану, образуют труднорастворимые карбиды или карбонитриды. Углерод, выводя титан из твердого раствора, снижает прочность сталей. Образующиеся карбиды или карбонитриды титана выделяются либо в виде скоплений, либо по границам зерен, что приводит к существенной потере пластичности и может спровоцировать преждевременные хрупкие разрушения [17]. Типичная микроструктура сталей рассматриваемой системы легирования с карбонитридными выделениями представлена на рис. 1.

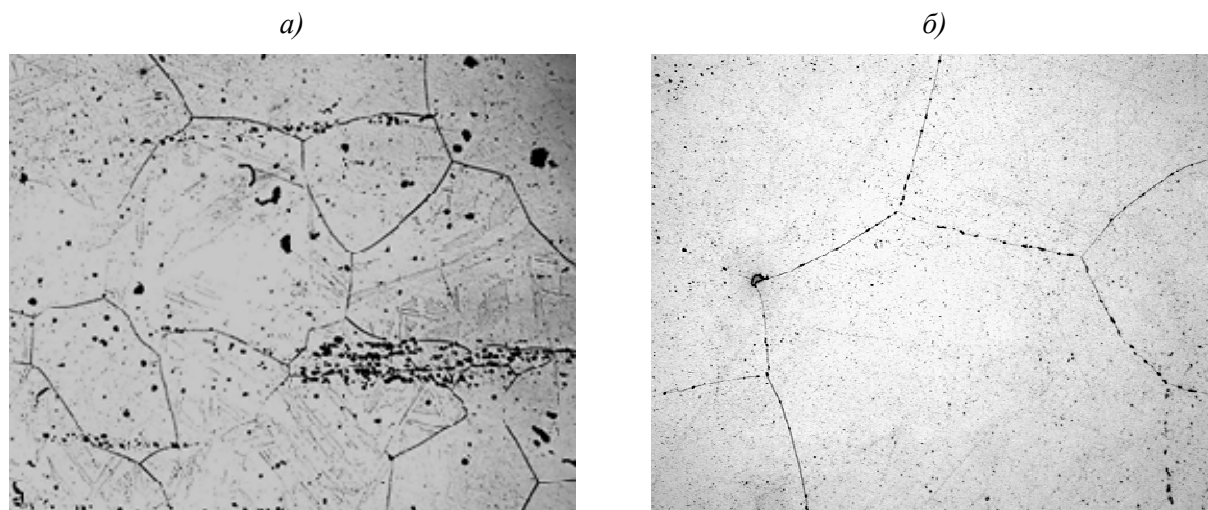


Рисунок 1. Микроструктура ($\times 100$) мартенситостареющих сталей с карбонитридными выделениями в виде скоплений (а) и по границам зерен (б)

Сталь ВКС-180, выплавленная методом ИД, обеспечивает следующий уровень механических свойств: $\sigma_B \geq 1720$ МПа; $\psi \geq 50\%$, $KCU \geq 49$ Дж/см² и $\psi \geq 35\%$, $KCU \geq 34$ Дж/см² в долевом и поперечном направлениях соответственно (прутки диаметром до 170 мм).

При производстве особо низкоуглеродистых мартенситостареющих сталей имеются некоторые особенности: после горячей деформации слитков (в условиях отечественного производства) не удастся получать однородную мелкозернистую структуру в полуфабрикатах больших сечений – величина зерна в крупноразмерных заготовках колеблется от 0 до 5 балла. Для устранения разнотерности, выравнивания ликвационной неоднородности, растворения карбонитридов титана и, следовательно,

повышения механических свойств, в том числе пластичности и вязкости, в ВИАМ разработан специальный режим термообработки, включающий закалку с высоких температур с охлаждением в воде и последующую закалку для получения однородной мелкозернистой структуры. Применение этого режима термообработки для крупномерных деталей обеспечивает высокую пластичность в поперечном направлении. Однако режим термической обработки стали ВКС-180-ИД достаточно сложен и энергоемок.

В отечественной промышленности получение наиболее чистого металла по углероду и азоту с минимальным газонасыщением обеспечивает метод выплавки ИЛ – вакуумно-индукционная выплавка (ВИ) с последующим электронно-лучевым переплавом (ЭЛП). После электронно-лучевого переплава содержание азота уменьшается в ~ 2 раза по сравнению с вакуумно-дуговым переплавом [18]. В научной литературе имеются сведения, что применение процесса ЭЛП в сталях указанной системы легирования значительно уменьшает количество неметаллических включений: суммарное количество неметаллических включений после ЭЛП составляет $\sim 0,046\%$ (по массе), а после ВДП $\sim 0,079\%$ (по массе) [19].

Выплавка стали ВКС-180 методом электронно-лучевого переплава (ЭЛП) позволяет уменьшить содержание углерода до $\leq 0,01\%$ и азота до $\leq 0,005\%$ вместо $C \leq 0,02\%$, $N \leq 0,01\%$ на металле после ИД. Получен металл высокой чистоты по неметаллическим включениям: от 0 до 1 балла (ГОСТ 1778) – для металла, выплавленного методом ИЛ, от 1,5 до 2 – для металла ИД.

Высокая чистота металла после ЭЛП позволила существенно упростить и повысить энергоэффективность процесса термической обработки стали ВКС-180 по сравнению с металлом после ВДП. Удалось снизить температуру первой гомогенизирующей закалки примерно на 100°C , уменьшить количество последующих закалок для измельчения зерна с трех до двух раз при обеспечении бездефектной мелкозернистой структуры с величиной зерна 7–8 балла вместо 5–6 балла (по шкале ГОСТ 5639) на стали ИД. Микроструктура стали ВКС-180-ИЛ приведена на рис. 2.

Оценка механических свойств стали ВКС-180-ИЛ, термообработанной по энергоэффективному режиму, проводилась на полуфабрикатах различных сечений. Полученные результаты приведены в табл. 1.

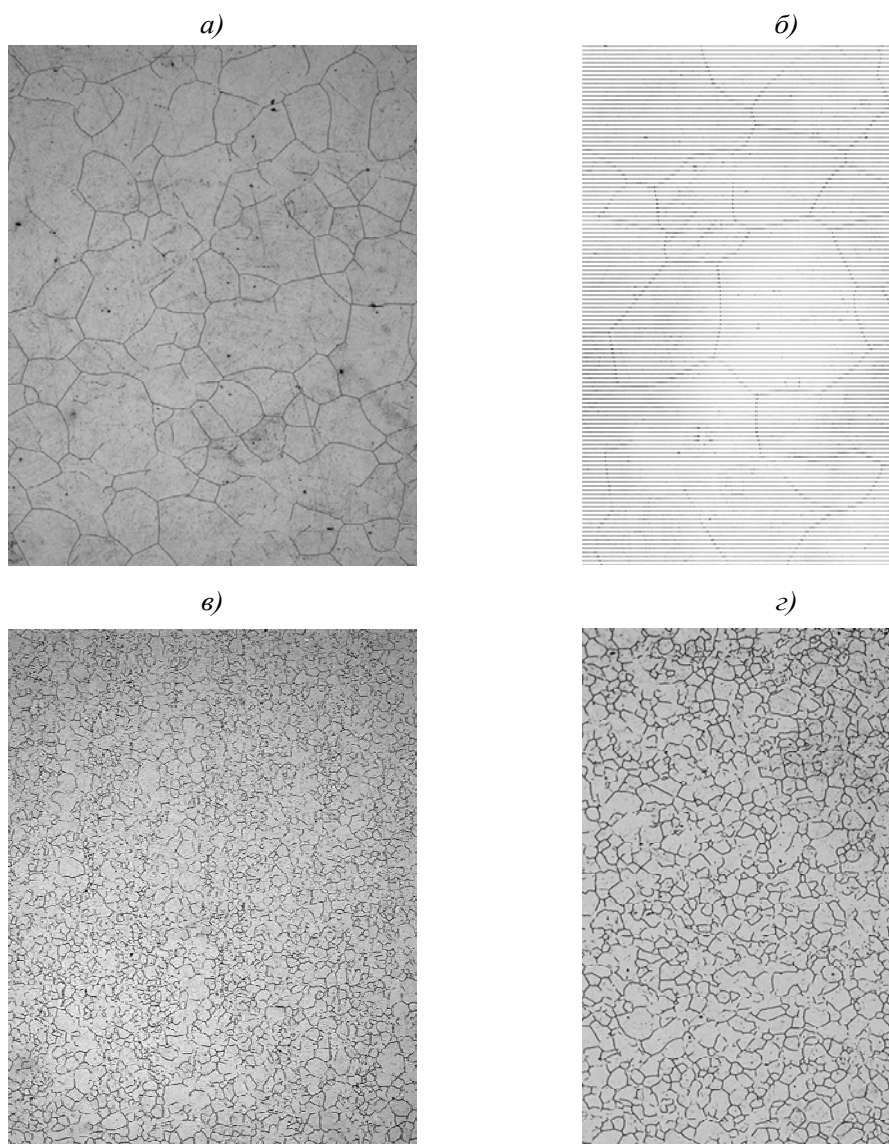


Рисунок 2. Микроструктуры ($\times 100$) сталей ВКС-180-ИЛ (а, в) и ВКС-180-ИД (б, г) после гомогенизирующей закалки (а, б) и перекристаллизационных закалок (в, г)

Таблица 1

**Механические свойства стали ВКС-180-ИЛ,
термообработанной по энергоэффективному режиму**

Полуфабрикат	Направление волокна	σ_b , МПа	ψ , %	KCU , Дж/см ²
		Средние значения		
Сутунка ($\delta=16$ мм)	Долевое	1800	60,5	60
	Поперечное	1820	52	52
Пруток ($\square 90$ мм)	Долевое	1775	59	64
	Поперечное	1785	45	47
Пруток ($\square 150$ мм)	Долевое	1755	56	62
	Поперечное	1760	45	43

Анализ полученных результатов показывает, что сталь ВКС-180-ИЛ, термообработанная по энергоэффективному режиму, имеет высокий комплекс механических свойств в полуфабрикатах различных сечений и обладает низкой анизотропией свойств при вязком пластичном характере разрушений.

Результаты исследования характеристик стали ВКС-180-ИЛ, термообработанной по энергоэффективному режиму, в сравнении с отечественными сталями, применяемыми для валов ГТД, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства стали ВКС-180-ИЛ в сравнении с аналогами (не менее)

Свойства	Направление волокна	Значения свойств для стали			
		ВКС-180-ИЛ	ВКС-180-ИД	ЭП517	ЭИ961
σ_b , МПа	Долевое	1720	1720	1130	1080
	Поперечное			–	–
ψ , %	Долевое	55	45	50	50
	Поперечное	45	35	–	–
KCU , Дж/см ²	Долевое	55	49	59	50
	Поперечное	42	34	–	–
σ_{-1} , МПа ($N=2 \cdot 10^7$ цикл)	Долевое	670	650	550	520*

* $N=1 \cdot 10^7$ цикл.

Применение высокопрочной конструкционной мартенситостареющей стали ВКС-180-ИЛ более высокого качества, чем сталь ВКС-180-ИД, позволит повысить надежность деталей на 10–15% и уменьшить энергозатраты за счет снижения температуры гомогенизирующей закалки на $\sim 100^\circ\text{C}$ и сокращения количества перекристаллизационных закалок с трех до двух раз. Увеличение прочности на $\sim 30\%$ по сравнению со сталями ЭП517 и ЭИ961, применяемыми для валов ГТД, позволит повысить, с учетом конструктивных особенностей, весовую эффективность и долговечность валов на $\sim 15\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Новая высокопрочная экономнолегированная азотсодержащая сталь повышенной надежности //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 84–88.
2. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситностареющие стали. М.: Металлургия. 1970. 223 с.
3. Шалькевич А.Б., Маркова Е.С., Покровская Н.Г. Мартенситностареющая сталь ВКС-180 – перспективный материал для двигателей ГТД /В сб.: Всероссийская науч. школа для молодежи «Материал и энергосберегающие технологии для производства ответственных деталей высокоэффективных газотурбинных двигателей, промышленных энергетических силовых установок и приводов»: сборник лекций. М.: ВИАМ. 2010. С. 98–103.
4. Маркова Е.С., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б., Громов В.И. Мартенситностареющие стали – новые перспективные материалы для валов ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 81–84.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
6. Фалалеев С.В. Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов: электронное учебное пособие. Самара. 2012. 106 с.
7. Лейбова Н.М., Зотьева А.С., Коган Е.С., Феликсон А.Е. О применении мартенситностареющих сталей для деталей металлорежущих станков //МиТОМ. 1974. №10. С. 12–15.
8. Арзамасов Б.Н., Ховова О.М., Перкас М.Д. Пути совершенствования свойств мартенситностареющих сталей //Заготовительные производства в машиностроении. 2003. №9. С. 43–46.
9. Беляков Л.Н. К вопросу о механизме $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения в мартенситностареющих сталях //Металлургия. 1976. №3. С. 17–22.
10. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиастроении /В сб. Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2002. С. 180–191.
11. Вылежнев В.П., Коковьякина С.А., Симонов Ю.Н., Сухих А.А. Повышение характеристик надежности мартенситностареющей стали 03Н18К9М5Т путем создания структуры типа «нанотриплекс» //МиТОМ. 2010. №11. С. 20–24.

12. Шлямнев А.П. и др. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: Справочник. М.: Интермет Инжиниринг. 2000. 232 с.
13. Шалькевич А.Б., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Маркова Е.С. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для самолетов нового поколения /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 142–150.
14. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
15. Ломберг Б.С., Покровский А.А., Топилин В.В., Ревякина О.К., Щербаков А.И. Влияние способа переплава на качество мартенситностареющей стали //Сталь. 1973. №8. С. 72–74.
16. Сергеев А.Б., Швед Ф.И., Тулин Н.А. Вакуумный дуговой переплав конструкционной стали. М.: Metallurgy. 1974. 192 с.
17. Маркова Е.С., Ревякина О.К., Петраков А.Ф. Новая высокопрочная мартенситностареющая сталь ВКС-170 /В сб.: Авиационные материалы. Вып. «Высокопрочные стали». 1986. С. 40–44.
18. Щербаков А.И., Ломберг Б.С., Оборенкова А.С. Некоторые закономерности кристаллизации при ЭЛП и ВДП //Специальная электрометаллургия. 1973. №22. С. 34–38.
19. Ревякина О.К., Петраков А.Ф., Сачков В.В., Щербаков А.И. Усовершенствование мартенситностареющих сталей на основе системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti //МиТОМ. 1981. №6. С. 15–19.