

УДК 620.1

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАКАЛКИ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ ТИПА ВКС-180 С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Наталья Александровна Якушева

*Студентка 5 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научные руководители: А.Б. Шалькевич⁽¹⁾, Е.С. Маркова⁽²⁾, Л.В. Тарасенко⁽³⁾,
кандидат технических наук, начальник лаборатории высокопрочных конструкционных
и коррозионностойких сталей ФГУП «ВИАМ»⁽¹⁾,
ведущий инженер лаборатории высокопрочных конструкционных и
коррозионностойких сталей ФГУП «ВИАМ»⁽²⁾,
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана⁽³⁾*

В настоящее время для разработки деталей ГТД конструкторами и материаловедцами ведется активный поиск новых материалов для валов турбин, превосходящих по прочностным параметрам (при сохранении характеристик надежности) традиционно применяемые мартенситные стали ЭП517 и ЭП866 [1].

Высокопрочные стали в планере современного самолета продолжают занимать существенное место и составляют 15...20 % от его общей массы. Это обусловлено наличием у этих материалов наиболее оптимального сочетания, по сравнению с другими материалами, высокой статической и усталостной прочности с хорошей технологичностью, а также сравнительно низкой стоимостью. Определенным преимуществом является и возможность уменьшения массы конструкций при использовании высокопрочных сталей.

В то же время требования к высокопрочным сталям все более возрастают. Они должны надежно работать во все более жестких климатических условиях, в том числе морских.

Одним из путей дальнейшего прогресса в использовании высокопрочных материалов является поиск новых композиций сталей и сплавов и более простых способов упрочнения. Так как углерод не только повышает предел прочности, но и одновременно увеличивает склонность сталей к хрупкому разрушению, можно было ожидать, что лучшее сочетание механических свойств, в частности высокой прочности, высокой пластичности и вязкости, может быть достигнуто на безуглеродистых материалах, упрочняемых старением. Исследования в этом направлении привели к созданию принципиально нового класса высокопрочных материалов – мартенситностареющих сталей, появившихся в конце 20 века [2].

Мартенситностареющие стали можно использовать в широком диапазоне температур (от криогенных до 400...500 °С).

В настоящее время, по данным зарубежных источников, мартенситностареющие стали применяют для изготовления тяжелонагруженных деталей: подводные крылья, отдельные узлы двигателей, деталей рефрижераторных и криогенных установок, а также обшивки судов.

В качестве перспективных материалов, которые обладают требуемым комплексом механических свойств и характеристик надежности, для изготовления валов двигателей могут рассматриваться высокопрочные конструкционные

мартенситностареющие стали (ВКС) системы легирования Fe-18Ni-8Co-5Mo-Ti. Во Всероссийском институте авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ») для возможного решения этой задачи, была разработана мартенситностареющая сталь с 18 % Ni, обеспечивающая предел прочности $\sigma_B = 1720 \dots 1865$ МПа, работоспособная до температур 400 °С (ВКС-180) (Патент RU № 2334017).

Особенностью мартенситностареющих безуглеродистых сталей ($C \leq 0,03$ %) с 18 % Ni, легированных кобальтом и молибденом, титаном и алюминием, является получение в результате закалки высокопластичного безуглеродистого мартенсита, который при последующем старении упрочняется за счет интерметаллидного упрочнения при температурах (450...500 °С). Упрочнение происходит за счет выделения высокодисперсных фаз типа Ni_3Ti и Ni_3Al . Однако практика показала, что введение в стали титана предпочтительнее, так как частицы основной упрочняющей фазы Ni_3Ti являются более высокодисперсными, чем частицы фазы Ni_3Al . В сталях, упрочняемых титаном, обеспечивается более высокая пластичность и ударная вязкость. Поэтому алюминий при выплавке этих сталей используется в основном в качестве раскислителя и его содержание ограничивается на уровне $\sim 0,1$ %.

Эти стали характеризуются высокой технологичностью. Закалка для этого класса сталей является смягчающей обработкой. Твердость в закаленном состоянии относительно невысокая и составляет 26...34 HRC, что позволяет выполнять все виды механической обработки без затруднений, изготавливая практически полностью готовые детали с незначительными припусками под чистовые размеры.

При высоком уровне прочности сталей ($\sigma_B \geq 1700$ МПа) необходимо обеспечить высокую чистоту металла по неметаллическим включениям. Исследованиями было установлено, что для получения требуемого комплекса механических свойств и при низкой анизотропии в мартенситностареющих сталях должно быть минимизировано содержание серы и фосфора, причем содержание каждого из этих элементов не должно превышать 0,01 % [1]. Также должно быть минимизировано содержание углерода и азота путем использования в металлургическом производстве различных переплавов: вакуумно-дугового (ВДП) и электронно-лучевого (ЭЛП).

Углерод в сталях рассматриваемой системы легирования является вредным элементом, так как обладает высоким химическим сродством к титану и образует с ним труднорастворимые при закалке карбиды или карбонитриды. При замедленном охлаждении крупногабаритных полуфабрикатов в области температур деформации (~ 1000 °С) частицы этих соединений выделяются в виде скоплений либо по границам зерен, что приводит в дальнейшем к резкой потере пластичности сталей и может спровоцировать хрупкие разрушения. Кроме того, связывание титана в карбиды или карбонитриды приводит к снижению его содержания в твердом растворе, что снижает прочность при старении.

Для обеспечения на высокопрочных низкоуглеродистых мартенситностареющих сталях оптимального комплекса характеристик прочности и надежности материала, необходимо использовать вакуумные методы выплавки, чистые шихтовые материалы, специальные способы раскисления.

В качестве раскислителей и модификаторов для мартенситностареющих сталей используются щелочноземельные и редкоземельные элементы (кальций или магний, лантан и бор) в количестве 0,03...0,05 %. Эти элементы обеспечивают достаточно глубокое раскисление, способствуют формированию преимущественно глобулярных неметаллических включений, уменьшают концентрацию вредных примесей в твердом растворе и улучшают состояние границ зерен.

Многочисленные исследования, выполненные в ФГУП «ВИАМ» по разработке составов, освоению металлургического производства высокопрочных

низкоуглеродистых конструкционных мартенситностареющих сталей, показали, что наименее газонасыщенный и наиболее чистый металл получается при использовании «дуплекс» вакуумной выплавки: вакуумно-индукционная выплавка с последующим вакуумно-дуговым переплавом - «ИД» (ВИ + ВДП). Такой способ выплавки сталей рассматриваемой системы легирования обеспечивает содержание углерода на уровне $C \leq 0,02 \%$. Однако, даже при столь низком содержании углерода, мартенситностареющие стали склонны к образованию выделений карбонитридов по границам зерен, что вызывает снижение пластичности. Поэтому одной из перспективных задач по улучшению свойств является снижение содержания углерода до $C \leq 0,01 \%$ [1].

Одним из самых эффективных способов получения высококачественных металлов является применение прогрессивных металлургических методов, в первую очередь – электронно-лучевого переплава (ЭЛП). Многочисленными исследованиями установлено, что в условиях ЭЛП реакция обезуглероживания мартенситностареющих сталей получает большее развитие, чем процесс взаимодействия кислорода с титаном и алюминием.

Таким образом, в отечественной металлургии более эффективным является «дуплекс» метод выплавки «ИЛ», включающий в себя вакуумно-индукционную выплавку с последующим электронно-лучевым переплавом (ВИ + ЭЛП), позволяющий получить в 18 % Ni мартенситностареющих сталях углерод $C \leq 0,01 \%$ [3].

Следует отметить, что после горячей деформации мартенситностареющих сталей (полуфабрикатов больших сечений) структура получается разнотернистая (балл зерна от 0 до 5 шкалы ГОСТ 5639). При этом по границам зерен может присутствовать большое количество частиц карбонитридов титана, которые образуются при медленном охлаждении в интервале температур 1050...750 °С после нагрева до температур 1200 °С. Закалка в области температур ~ 800 °С не исправляет исходных дефектов структуры, так как при этой температуре не происходит ни растворение неметаллических включений, ни перекристаллизация. Частицы карбонитрида титана приводят к ослаблению границ зерен и, как следствие, к потере прочностных характеристик и к крайне низким значениям пластичности, особенно в поперечном направлении – сужение падает до $\psi \approx 5 \%$.

Типичная микроструктура 18 % Ni мартенситностареющих сталей в охрупченном состоянии (медленное охлаждение с температур деформации) приведена на рис. 1.



Рис. 1. Мартенситностареющая сталь. Охрупченное состояние

Проблему устранения влияния на пластичность (ψ) охрупчивания в 18 % Ni мартенситностареющих сталей, в том числе и стали ВКС-180, специалисты решают следующим образом. Для растворения охрупчивающих выделений проводят высокотемпературную закалку при температурах нагрева 1050...1200 °С с охлаждением в воде.

Для последующего измельчения зерна проводят цикл закалок при температурах нагрева ~ 950 °С так же с быстрым охлаждением в воде. Применение такого цикла закалок позволяет повысить пластичность в поперечном направлении до $\psi = 30...50$ %. Для улучшения коррозионной стойкости сталей рассматриваемой системы легирования проводят закалку с температур ~ 800 °С с охлаждением на воздухе или в воде [1].

После закалки с 1150...1200 °С границы зерен без охрупчивающих выделений, величина зерна соответствует 2...3 баллу шкалы ГОСТ 5639. После 3-х кратной закалки обеспечивается измельчение зерна до ~ 7 балла.

Микроструктуры стали ВКС-180ИД после соответствующих термообработок приведены на рис. 2 и 3.

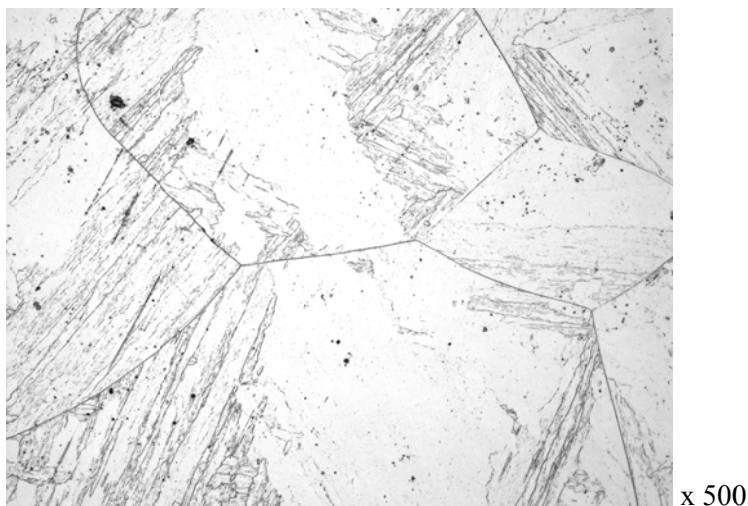


Рис. 2. Микроструктура стали ВКС-180ИД в состоянии после закалки с температуры 1200 ± 10 °С, 1 ч, охлаждение в воде

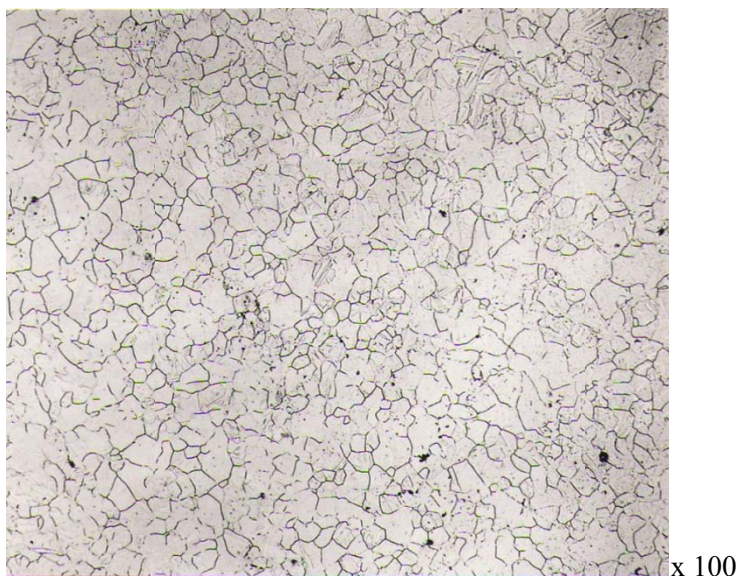


Рис. 3. Микроструктура стали ВКС-180ИД после цикла закалок: 1200 ± 10 °С, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °С, 1ч, вода

Для обеспечения уровня прочности $\sigma_B = 1720 \dots 1865$ МПа, соответствующего твердости 49,5...52 HRC, проводят старение при температуре 500...540 °С.

Исследования, проведенные на кованых прутках промышленного изготовления в сорте квадрат 90 мм и квадрат 150 мм в долевом и поперечном направлениях, показали, что сталь ВКС-180ИД имеет высокие показатели механических свойств при низкой анизотропии. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Табл. 1. Механические свойства прутков стали ВКС180-ИД
(квадрат 90 мм и квадрат 150 мм)

Направление вырезки образцов	HRC	σ_B	ψ
		МПа	%
Пруток квадрат 90 мм			
Долевые	52,0	1900	54,0
Поперечные	52,0	1910	47,0
Пруток квадрат 150 мм			
Долевые	51,5...52,0	1900	54,0
Поперечные	51,5...52,0	1920	48,5

В задачу настоящей работы входила разработка режима термической обработки для стали ВКС-180, изготавливаемую методом выплавки «ИЛ» (ВИ + ЭЛП), который бы обеспечивал получение однородной и мелкозернистой структуры с размером зерна ~ 7 балла по ГОСТ 5639 [1].

Можно предположить, что температура растворения карбонитридных включений для стали ВКС-180ИЛ с содержанием углерода $C \leq 0,01$ % может быть существенно ниже 1200 °С, которая необходима для стали ВКС-180ИД с содержанием углерода $C \leq 0,02$ %, и находится в области температур 1000...1100 °С [4].

Поиск возможности снижения температуры первой заковки при сохранении комплекса механических свойств и характеристик надежности позволит повысить как энергоэффективность процесса термической обработки, так и технологичность стали ВКС-180 в производстве.

Были проведены исследования микроструктуры после термической обработки с различной температурой заковки. Микроструктуру оценивали на инвертированном металлографическом микроскопе «Olympus» GX-51 после электролитического травления шлифов по ГОСТ 5639 в растворе: 55 г. лимонной кислоты, 6 мл H_2SO_4 , 200 мл дистиллированной воды при силе тока $I = 1,5 \dots 2$ А, время травления 60...90 сек. Микроструктуры стали ВКС-180ИЛ после соответствующих термообработок приведены на рис. 4 – 8.



x 100

Рис. 4. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1000 °С, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °С, 1ч, вода



x 100

Рис. 5. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1020 °С, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °С, 1ч, вода

Последующий анализ микроструктуры стали ВКС-180ИЛ показал, что после закалки с температур 1000...1020 °С остаются следы карбонитридной сетки. После закалки при нагревах в интервале температур 1050...1100 °С следов сетки в микроструктуре не отмечалось. При этом проведении закалок в исследуемом интервале температур (с последующей 3-х кратной перекристаллизацией при 940 °С) во всех случаях обеспечивается достаточно однородная мелкозернистая структура, соответствующая 6...8 баллу по ГОСТ 5639.

После этого были проведены испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84 для определения пластичности (ψ) стали ВКС-180ИЛ. Исследования проводились на металле промышленной выплавки. Заготовки образцов вырезались в поперечном направлении из горячекатаных сутунок толщиной $\delta \approx 16$ мм. Температура испытаний 20 °С.

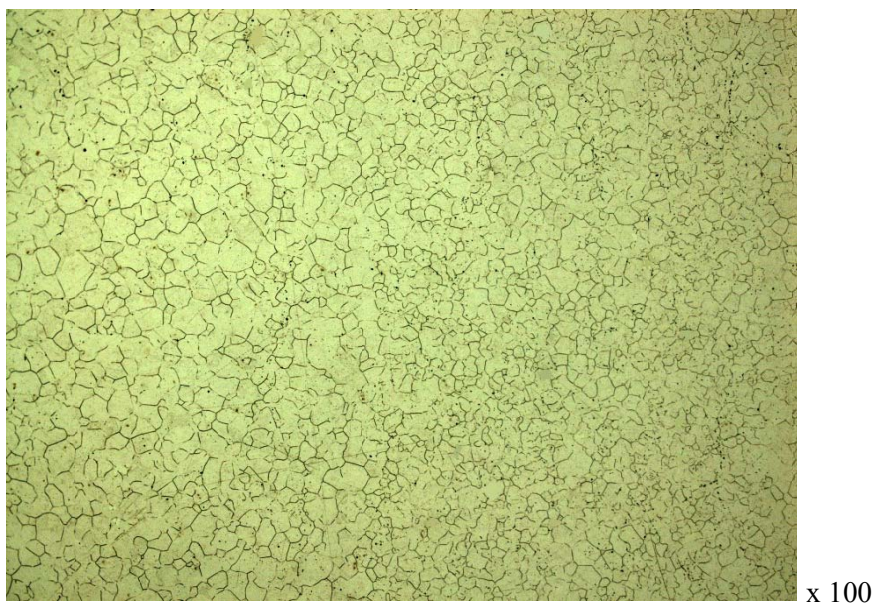


Рис. 6. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1050 °C, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °C, 1ч, вода

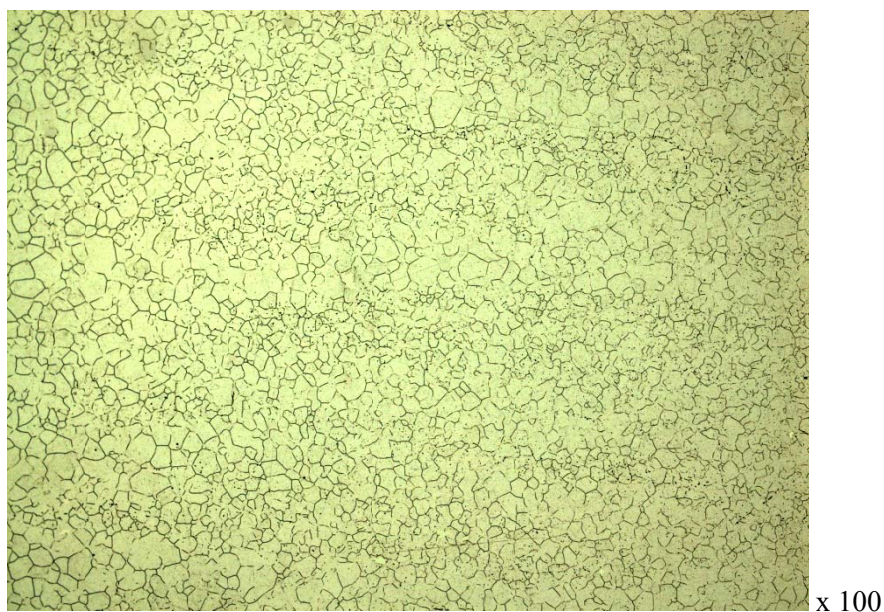


Рис. 7. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1070 °C, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °C, 1ч, вода

Свойства стали ВКС-180ИЛ после испытаний на растяжения приведены в табл. 2.

Табл. 2. Относительное сужение образцов из стали ВКС180-ИЛ

Температура первой заковки*, °C	Полуфабрикат	Направление вырезки образцов	σ _в , МПа	ψ, %
1000	Сутунка δ = 16 мм	Поперечное	1800...1810	48,5
1020				48,5...50,0
1050				51,5...52,5
1070				50,0...55,5
1100				53,5...55,5
*-. термическая обработка: охрупчивание + закалка (1000 – 1100) °C, вода + 3р. 940 °C, вода + 780 °C, воздух + 520 °C, 3ч, воздух				



Рис. 8. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1100 °С, 1 ч, вода + 3 раза (940 ± 10) °С, 1ч, вода

При сравнении значений относительного сужения в поперечном направлении у образцов из стали ВКС-180ИД (табл. 1) и ВКС-180ИЛ (табл. 2) было установлено, что сталь ВКС-180ИЛ имеет уровень пластичности в поперечном направлении выше, чем сталь ВКС-180ИД. Данный эффект, по всей видимости, связан с тем, что с увеличением температуры закалки происходит большее растворение охрупчивающих фаз, что приводит к увеличению пластических характеристик.

Результаты, полученные на данном этапе работ, показывают перспективность дальнейших исследований по упрощению режимов термической обработки стали ВКС-180ИЛ. Снижение температуры первой закалки мартенситносталяющей стали ВКС-180ИЛ по сравнению со сталью ВКС-180ИД не приводит к ухудшению микроструктуры этой стали, и получается достаточно однородная мелкозернистая структура. Кроме того, уменьшение содержания углерода до $C \leq 0,01\%$ благодаря применению способа выплавки «ИЛ» позволяет обеспечить пластичность стали в поперечном направлении на высоком уровне ($\psi_{\text{поп}} \geq 45\%$). Однако однозначный вывод о корректировке температуры первой закалки возможно будет сделать после изучения полного комплекса механических свойств и характеристик надежности стали ВКС-180ИЛ.

Литература

1. Шалькевич А.Б., Маркова Е.С., Покровская Н.Г. «Мартенситносталяющая сталь ВКС-180 – перспективный материал для двигателей ГТД», сборник лекций «Материал и энергосберегающие технологии для производства ответственных деталей высокоэффективных газотурбинных двигателей, промышленных энергетических силовых установок и приводов», - ФГУП «ВИАМ», 2010. - 115с.
2. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситно-сталяющие стали. – М.: Металлургия, 1970. - 224с.
3. Ревякина О.К., Петраков А.Ф., Сачков В.В., Щербаков А.И. «Усовершенствование мартенситносталяющих сталей на основе системы Fe-Ni-Co-Mo-Ti», Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Машиностроение», 1981, - 65с.
4. Научно-технический сборник. Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. Высокопрочные стали. 1986г, с.1-124 (ВИАМ)