

УДК 669.018.28:669.295

А.С. Кочетков¹, Н.А. Ночовная¹, К.А. Боков¹

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОГО ЛИТЕЙНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT40L

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-4-4

Рассмотрены основные этапы получения отливок из сплава VT40L: система легирования, изготовление форм, выбор режимов выплавки слитков и заливки форм, режимы горячего изостатического прессования, методы диагностики внутренних дефектов в отливках. Особое внимание уделено комплексному легированию элементами (α - и β -стабилизаторами), а также дополнительному легированию кислородом и углеродом. Показано влияние комплексного легирования на прочность сплава. Рассмотрены преимущества применения керамических форм перед графитовыми. Установлено, что для получения качественных отливок необходимо соблюдение всех технологических операций.

Ключевые слова: литейные титановые сплавы, центробежная заливка, слитки, отливки, керамические формы.

The basic stages of producing castings of VT40 alloy, doping system, mold, selecting a mode of ingots and forms melting, HIP modes, method of internal defects diagnostics are considered. Particular attention is paid to complex alloying additions of α - and β -stabilizers, as well as additional doping with oxygen and carbon. The effect of doping on the comprehensive strength of the alloy is shown. The advantages of ceramic molds application comparing with graphite ones are considered. It is found that to obtain high-quality castings it is necessary to observe all technological operations.

Keywords: titanium alloys, mold, casting, melt ingots, doping system, HIP.

¹Федеральное 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

Введение

В настоящее время в отечественной промышленности при производстве авиационной техники используется широкая номенклатура фасонных отливок из титановых сплавов. Применение фасонного литья позволяет существенно сократить расход материалов (КИМ штамповок составляет 0,12, а фасонных отливок: 0,35) и трудоемкость их механической обработки. Технология фасонного литья обеспечивает получение сложных по геометрической форме отливок с высокими характеристиками усталостных свойств, что позволит существенно расширить номенклатуру используемых отливок, повысить их качество и сократить брак при литье.

Большинство отливок из титановых сплавов производится в разовых литейных формах, изготовленных по выплавляемым моделям. Центробежный способ литья титановых сплавов, высокая химическая активность титана обуславливают комплекс требований к материалам керамических форм: прочность к воздействию ударных и изгибающих нагрузок, термостойкость и химическая инертность к заливаемому металлу.

Технология литья титановых сплавов по выплавляемым моделям позволяет получать отливки различных форм и размеров с высоким коэффициентом использования металла. В настоящее время разработаны и внедрены в промышленность два различных

технологических варианта получения форм по выплавляемым моделям: изготовление форм на основе графитовых материалов и электрокорунда.

Известно, что качество отливок во многом определяется устойчивостью форм к воздействию на их внешний слой химически активных расплавов титановых сплавов. Образующийся на поверхности отливки газонасыщенный слой снижает механические свойства титановых сплавов.

В настоящей работе при получении тонкостенных отливок из нового высокопрочного литейного титанового сплава ВТ40Л с использованием серийной технологии центробежного литья использованы керамические формы, изготовленные по общепринятой технологии послойного формирования керамического покрытия на восковых моделях.

Материалы и методы

В качестве материала для исследований выбраны отливки из высокопрочного литейного титанового сплава ВТ40Л, химический состав которых приведен в таблице. Определение химического состава образцов проводили методом спектрального анализа на спектрометре S4 Explorer по ГОСТ 23902–79. Корундовая керамическая форма изготовлена с внутренним слоем из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия.

Химический состав отливки из сплава ВТ40Л

Содержание легирующих элементов, % (по массе)							
Al	V	Mo	Zr	Fe	Si	C	O
5,75	0,95	0,67	0,55	0,39	0,09	0,11	0,14

Определение механической прочности при трехточечном изгибе выполняли по ГОСТ 473.8–81 на керамических образцах-свидетелях, скорость приложения нагрузки на образец при испытании составляла 6 мм/мин.

Для микроструктурных исследований сплава ВТ40Л изготавливались шлифы в соответствии с ПИ1.2785–2009 «Металлографический анализ титановых сплавов». Определение микроструктурных параметров проводилось на оптических микроскопах Neophot-21 и Versamet Union.

Анализ макроструктуры отливок из литейного титанового сплава ВТ40Л проводили в соответствии с ПИ1054 «Металлографический анализ титановых сплавов» на шлифах после травления раствором стандартного состава (20% HF+25% HNO₃+55% вода) на установке Wild Heerbrugg Stereo 40/14.

Результаты

При разработке сплава ВТ40Л использован метод комплексного легирования элементами замещения и внедрения. Для расчета прочности сплава применена методика, предложенная профессором Б.А. Калачевым, в основу которой положен алюминиевый прочностной эквивалент.

Большое внимание при получении сплава ВТ40Л уделено дополнительному легированию кислородом и углеродом. В связи с тем что титановая губка содержит 0,04–0,06% (по массе) кислорода, проводили дополнительное легирование кислородом и углеродом. В качестве шихтовых материалов при изготовлении слитка использовались: титановая губка (ТГ110), лигатура АМВТ, алюминий, цирконий, кремний, железо. Все легирующие элементы перед прессованием измельчались и просушивались при температуре 200°С для удаления адсорбционной влаги.

Прессованные электроды получали способом непрерывного прессования шихты в прошивную матрицу с внутренним диаметром 100 мм на прессе с усилием 200 тс.

Режим плавки слитков выбран из расчета объема ванны жидкого металла, чтобы в расплавленном состоянии постоянно находились пять порций шихты. Такой процесс плавки обеспечивает получение стабильного химического состава по всему объему слитка.

При разработке литейного сплава необходимо учитывать его технологические характеристики, которые определяют способность сплава заполнять формы и получать качественные детали по геометрической форме и плотности.

К литейным характеристикам сплава, определяющим его технологичность, относятся: жидкотекучесть, заполняемость, линейная и объемная усадка.

Жидкотекучесть определяет способность сплава в жидком состоянии заполнять канал пробы до остановки жидкого потока металла. Длина залитой пробы определяет текучесть сплава. В сплавах с широким интервалом кристаллизации – жидкотекучесть низкая, сплавы с узким интервалом кристаллизации имеют хорошую заполняемость. Из титановых литейных сплавов наилучшая заполняемость у сплава ВТ5Л (длина залитой пробы составляет 560 мм).

Жидкотекучесть для литейных титановых сплавов определяется по спиральной пробе треугольного сечения шириной 10 мм и высотой 15 мм. Длина спирали для сплава ВТ40Л определялась по трем пробам, залитым в одинаковых условиях. Длина залитых проб составляла 518, 521 и 515 мм. Среднее значение трех проб, равное 517 мм, – это и есть величина жидкотекучести сплава. Литейный титановый сплав ВТ40Л по жидкотекучести близок к сплавам ВТ5Л и ВТ20Л.

В процессе исследования технологических свойств сплава определяли величину линейной усадки. Значение линейной усадки крайне необходимо, чтобы правильно спроектировать литейную оснастку с учетом усадки металла и иметь точную геометрическую форму отливки.

Величина линейной усадки определялась по специальной пробе круглого сечения диаметром 20 мм и длиной 250 мм. Разница между длиной пробы и отливки – это и есть величина усадки, выраженная в процентах. В данном случае усадка сплава равна 1%.

При проектировании пресс-форм для восковых моделей или металлических копий необходимо учитывать величину усадки металла при переходе из жидкого в твердое состояние, равную 1%.

Заполняемость – это возможность заполнять тонкие и толстые каналы формы, изготовленной из различных тугоплавких материалов (графита, кокса, электрокорунда), магнезита и оксида циркония, жидким металлом. Заполняемость литейного титанового сплава ВТ40Л находится на уровне аналогичной характеристики сплава ВТ20Л.

Качество получаемых фасонных отливок из титановых сплавов улучшается при использовании инертной керамической формы. С целью повышения инертности применяют комбинированные (многослойные) керамические формы, внутренний слой которых обладает специальными свойствами, снижающими загрязнение металла отливки продуктами взаимодействия.

В процессе проведения эксперимента методом послойного нанесения керамической суспензии на модельные блоки с последующей обсыпкой крупнозернистым порошком электрокорунда и сушкой в потоке воздуха изготовлены керамические формы на основе водного связующего. Прокалку форм проводили в электрической печи с силитовыми нагревателями при температуре 1200°C в течение 5 ч (рис. 1).

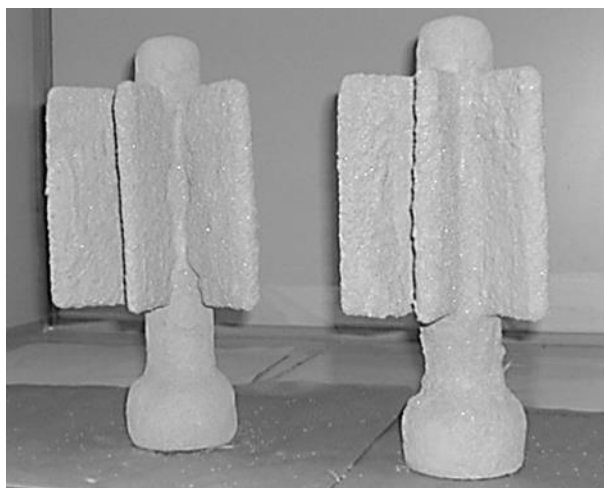


Рис. 1. Внешний вид керамических форм

Для определения механических свойств керамической формы изготовлены образцы размером $5 \times 20 \times 40$ мм, расчет проводился по формуле: $\sigma_{\text{изг}} = 3Pl / (2bh^2)$.

Полученные значения прочности ($\sigma_{\text{изг}} = 26,5$ МПа) позволяют проводить заливку металла с гравитационным коэффициентом, равным 12.

Плавку и заливку форм проводили на установке ВДЛ-5. Для этого использовали слитки из сплава ВТ40Л, полученные методом вакуумно-дуговой плавки с расходным электродом массой 25 кг.

Режим плавки проводили при максимальных параметрах силы тока и напряжения, чтобы иметь повышенную температуру жидкого металла, равную $1850\text{--}1900^\circ\text{C}$.

Заливку форм проводили центробежным методом с учетом влияния повышенного давления центробежных сил на жидкий металл, залитый в форму. Скорость слива металла составляет ~ 6 с, число оборотов центробежной машины: 100 ± 20 об/мин. Установлено, что для получения плотных тонкостенных отливок (толщина стенки до 2 мм) из литейных титановых сплавов ВТ5Л, ВТ6Л, ВТ20Л, ВТ40Л с минимальным размером пор 0,8 мм центробежное литье необходимо осуществлять при значении гравитационного коэффициента, равном 12. После заливки формы направляли на выбивку, где залитые детали отделяли от формы. Готовые детали подвергались механической обработке.

Внутренние дефекты (усадочные раковины, поры, рыхлоты) отливки из сплава ВТ40Л исследовали методом рентгеновского контроля (рис. 2, а). Для залечивания внутренних дефектов проводят горячее изостатическое прессование (ГИП).

Режимы ГИП определяются на основании данных по температуре полиморфного превращения и должны быть ниже ее ($T_{\text{п.п}}$) на $20\text{--}30^\circ\text{C}$. В связи с этим отливки из сплава ВТ40Л подвергают ГИП по следующему режиму: температура в камере прессования $960\text{--}970^\circ\text{C}$, давление $1300\text{--}1600$ ат, продолжительность выдержки при заданной температуре и давлении 3 ч. Для предотвращения (в процессе ГИП) окисления отливок, установленных в контейнере, от находящегося в аргоне кислорода их сверху накрывали титановой стружкой, которая поглощала кислород.

После проведения ГИП литые заготовки из сплава ВТ40Л подвергали повторно рентгеновскому контролю. В результате контроля установлено, что ранее выявленные дефекты в отливках отсутствуют (рис. 2, б).

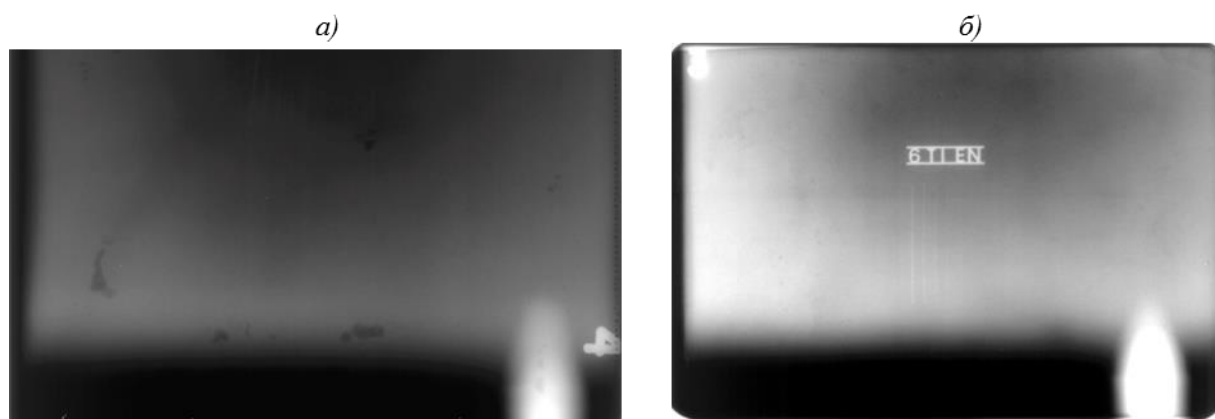


Рис. 2. Отливка из сплава ВТ40Л до (а) и после ГИП (б)

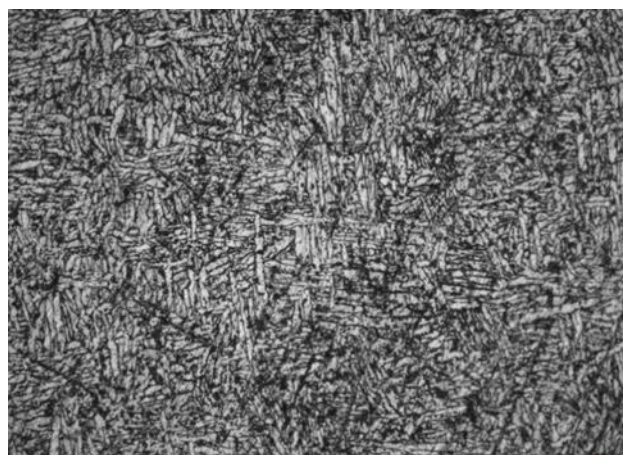


Рис. 3. Микроструктура ($\times 300$) литой заготовки из сплава ВТ40Л после ГИП

Исследование микроструктуры проводили на образцах после ГИП (рис. 3). Показано, что микроструктура сплава ВТ40Л матовая равноосная или близкая к ней (зона столбчатых кристаллов отсутствует). Видно, что повышение степени легирования титановых сплавов приводит к получению более тонкой пластинчатой структуры. Установлено, что горячее изостатическое прессование (ГИП) отливок из литейного титанового сплава ВТ40Л приводит к изменению морфологии α -фазы в результате процессов рекристаллизации с образованием глобулей размером не более 100 мкм.

Обсуждение и заключения

Применение комплексного легирования при шихтовке сплава ВТ40Л, керамических форм, изготовленных на основе водного связующего, оптимально подобранные режимы выплавки слитков, заливка форм с использованием центробежного метода, горячее изостатическое прессование позволили получить отливки с высоким качеством поверхности и уровнем механических свойств, близким к аналогичным характеристикам деформируемых конструкционных сплавов ($\sigma_B \geq 1000$ МПа).

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что применение данной технологии позволит получать отливки сложной формы.

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.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. научно-информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ. 2015. С. 427–430.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
3. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 5–6.
5. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 6–8.
6. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
7. Ночовная Н.А. Перспективы и проблемы применения титановых сплавов / В сб. *Авиационные материалы и технологии*. Вып. «Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов»: сб. докладов юбилейного совещания, посвященного 55-летию титановой лаборатории. М.: ВИАМ, 2007. С. 4–8.
8. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Боков К.А. Экономнолегированные титановые сплавы для слоистых металлополимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №11. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-2-2.
9. Кочетков А. С., Ночовная Н.А., Боков К.А. Особенности процесса плавки экономнолегированного литейного титанового сплава ВТ40Л // *Металлург*. 2015. №10. С.81–83.
10. Магницкий О.Н. Литейные свойства титановых сплавов. Л.: Машиностроение, 1968. 65 с.
11. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 27–33.
12. Ясинский К.К. Влияние содержания кислорода на механические и технологические свойства литейных титановых сплавов // *Титан*. 1998. №10. С. 7–12.
13. Калачев Б.А. Основные принципы легирования титановых сплавов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1996. №4. С. 14–23.
14. Братухин А.Г., Бибииков Е.Л., Глазунов С.Г. и др. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. М.: Изд-во ВИЛС, 1998. 154 с.
15. Андреев А.Л., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов. М.: Металлургия, 1978. 383 с.
16. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1992. 352 с.
17. Niinomi M. Recent trends in titanium research and development in Japan // *Proc. 12th World Conf. on Titanium*. 2011. V. I. P. 30–37.
18. Heglei Qu et al. Defects easy occur in VAR titanium ingots // *Proc. 12th World Conf. on Titanium*. 2011. V. I. P. 126–129.
19. Давыденко Л.В., Белова С.Б., Давыденко Р.А., Егорова Ю.Б. О возможности применения титановых сплавов в автомобилестроении // *Автомобильная промышленность*. 2010. №10. С. 41–43.
20. Cui Chunxiang, Hu BaoMin, Zhao Lichen, Liu Shuangjin. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development // *Materials and Design*. 2011. №32. P. 1684–1691.
21. Zhu J. et al. Influence of boron addition on microstructure and mechanical properties of dental cast titanium alloys // *Mat. Sci. & Eng.: A*. 2003. V. 339 (1–2). P. 53–62.

-
22. Schevchenko D.M., Ward R.M. Liquid metal pool behavior during the vacuum arc remelting of INCONEL 718 // *Metall. Mater. Trans. B*. 2009. V. 40B (6). P. 263.
 23. Thamar E. Mora and Swavik A. Spiewak. Prediction of temperature in vacuum arc remelting in the presence of strong disturbances // *Journal of Manufacturing Processes*. 2003. V. 5. №1. P. 46–53.
 24. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Изотова А.Ю. Перспективы разработки новых титановых сплавов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2011. №SP2. С. 60–67.
 25. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Ясинский К.К., Кочетков А.С. Специфика плавки и способы получения слитков интерметаллидных титановых сплавов с повышенным содержанием ниобия // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2011. №SP2. С. 53–59.
 26. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №3. Ст. 02. . URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.09.2015).