

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАБОТКИ ПОЛУФАБРИКАТОВ И ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

*К.К. Ясинский, Е.Н. Тарасенко*

## НОВЫЙ ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЛИТЕЙНЫЙ ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ВТ40Л

Важной задачей создания авиационно-космической техники является разработка конструкций летательных аппаратов и двигателей с высокой надежностью при минимальной массе и высокой технологичностью. Так как фасонное литье является экономически эффективным способом формообразования для титана, но имеет пониженный по сравнению с деформируемым металлом уровень механических свойств, конструкторскими бюро авиационной техники была поставлена задача по разработке литейного титанового сплава с прочностью  $\sigma_b \geq 1050$  МПа, повышенной долговечностью и технологическими характеристиками на уровне свойств промышленных литейных титановых сплавов ВТ20Л и ВТ6Л.

Новый литейный титановый сплав ВТ40Л, комплексно легированный небольшими добавками  $\beta$ -стабилизаторов с дополнительным упрочнением кислородом и углеродом, разработан с учетом высокого уровня требований, предъявляемых к современным конструкционным материалам. Нетрадиционный подход к созданию сплава, в композиции которого, кроме основных легирующих элементов Al, Mo, V, Zr, Fe, Si, использованы элементы внедрения – кислород и углерод, позволил наметить пути обеспечения высоких, особенно в отношении усталостной прочности, требований технического задания:  $\sigma_b \geq 1050$  МПа,  $\delta \geq 6\%$ ,  $KCU \geq 0,3$  МДж/м<sup>2</sup>,  $\sigma_{-1} \geq 340$  МПа ( $N=10^7$  циклов).

Пониженный уровень усталостной прочности (220–240 МПа) промышленных литейных титановых сплавов обусловлен характерными особенностями строения литого металла: крупнозернистостью, пластинчатым внутризерненным строением, наличием несплошностей. Ранее проведенные работы по модифицированию сплава ВТ5Л карбидом бора с целью измельчения литой структуры позволили повысить сопротивление усталости сплава до 320 МПа ( $N=10^7$  циклов). Но процесс модифицирования требует, чтобы модификатор вводили в расплав за 2–3 мин до слива металла в форму. Это технически сложно и требует дополнительных устройств на плавильных вакуумно-дуговых гарнисажных установках. В этой связи при разработке нового литейного титанового сплава учтены результаты ранее выполненных работ по модифицированию, комплексному многокомпонентному микролегированию, а также возможность использования кислорода и углерода как дополнительных упрочнителей и модификаторов сплава. В результате проведенных исследований и оценки разработанных ранее композиций сплавов был опробован, скорректирован и предложен для точного фасонного литья экономнолегированный титановый сплав ВТ40Л с повышенной прочностью и долговечностью, близкий по свойствам к деформированному материалу. Композиция сплава обеспечивает требуемый уровень механических свойств при минимальном использовании дорогих легирующих элементов, сумма которых не превышает 1,6%.

Использование специальной лигатуры и высокая точность шихтовки сплава путем контроля и учета содержания элементов замещения (Fe, Si) и внедрения (O, C) в титановой губке обеспечили получение качественных отливок со стабильным химическим составом и требуемыми механическими свойствами.

Важным условием получения высоких показателей механических свойств является применение газостатирования (ГИП) для устранения внутренних дефектов в отливках. Проведение газостатирования литых заготовок по оптимальному режиму ( $P=350$  МПа;  $T=T_{п.п.}-(20-30)^\circ\text{C}$ ;  $\tau=2-3$  ч) позволило обеспечить 100%-ную плотность и получить качественные образцы для проведения испытаний. Результаты испытаний образцов из сплава ВТ40Л при различных температурах приведены в табл. 1.

Механические свойства сплава ВТ40Л

Температура испытания, °С	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$	$\psi$	$KCU$	$KCT$	$\sigma_{100}^{350^\circ}$ , МПа
		%		МДж/м <sup>2</sup>		
-70	1340	7,3–8,5	14–21	–	–	–
+20	1070–1170	10,0–12,8	14–37	0,37–0,5	0,13–0,17	–
+350	790–855	10,7–12,7	27–40,3	–	–	760
+400	780–840	13,1–13,3	42	–	–	–

Усталостная прочность сплава (МнЦУ) при изгибе с вращением ( $f=50$  Гц) определялась при испытании гладких образцов ( $K_f=1$ ) и образцов с надрезом ( $K_f=2,2$ ;  $r_H=0,75$  мм) на базе  $N=10^7$  циклов и составляла  $\sigma_{-1}=400$  МПа и  $\sigma_{-1}^H=330$  МПа. Малоцикловая усталость (МЦУ) определялась при осевом растяжении ( $R=0,1$ ;  $f=5$  Гц) на базе  $N=5 \cdot 10^4$  циклов:  $\sigma_{\max}=700$  МПа ( $K_f=1$ ) и  $\sigma_{\max}^H=600$  МПа ( $K_f=2,2$ ;  $r_H=0,75$  мм). Критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плоской деформации  $K_{Ic}$  определяли на образцах размером  $88 \times 84 \times 30$  мм. Установлено, что для сплава ВТ40Л  $K_{Ic}=90$  МПа $\sqrt{м}$ , что на  $6-10$  МПа $\sqrt{м}$  превышает аналогичный показатель для деформированного металла.

Разработанный сплав имеет хорошую термическую стабильность:

после выдержки при  $350^\circ\text{C}$ , 100 ч .....  $\sigma_B=1140$  МПа;  $\delta=9,2\%$ ;

$KCU=0,475$  МДж/м<sup>2</sup>

до выдержки .....  $\sigma_B=1123$  МПа;  $\delta=10,1\%$ ;

$KCU=0,520$  МДж/м<sup>2</sup>.

Проведенные исследования показали, что новый экономнолегированный литейный сплав ВТ40Л имеет более высокий уровень гарантированных механических свойств, чем промышленные сплавы ВТ6Л и ВТ20Л, обеспечивает увеличение прочности на 20%, повышение сопротивления усталости на 30% и снижение массы конструкции на 15–20%.

Важной характеристикой литейного сплава является свариваемость, так как сварка – наиболее рациональный метод соединения литых деталей в конструкциях. Исследовано влияние АрДЭС и ЭЛС на основные механические свойства и структуру высокопрочного литейного титанового сплава ВТ40Л. Установлено, что из-за отсутствия в номенклатуре ГОСТ 27-265–87 сварочной проволоки с достаточно высоким уровнем прочности ( $\sigma_B=900$  МПа) АрДЭС не обеспечивает получение равнопрочного сварного шва. Для заварки литейных дефектов в отливках возможно использование сварочной проволоки ВТ20 1 и 2 составов.

В процессе выполнения работы были отработаны режимы ЭЛС для литых заготовок толщиной 10 и 20 мм, которые после сварки подвергали ГИП в целях исключения дефектов в сварном шве. Результаты определения механических свойств сварного соединения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства сварных соединений (ЭЛС) сплава ВТ40Л

Вид образца	Температура испытания, °С	$\sigma_B$	$\sigma_{100}$	$\sigma_{-1}$	$KCU$	$KCT$
		МПа			МДж/м <sup>2</sup>	
Основной материал	+20	1050–1054	–	–	0,543–0,562	0,543–0,562
Сварное соединение	+20	1022–1042	–	350	0,505–0,533	0,110–0,145
	-70	1180–1230	–	–	–	–
	+350	655–680	640	–	–	–

Применение ЭЛС позволяет получить для сварного соединения практически равнопрочный шов с 5%-ным снижением пластичности ( $\sigma_{в.св}/\sigma_{в} \geq 0,95$ ;  $KCU_{св} = 0,505 - 0,533$  МДж/м<sup>2</sup>).

Свойства сварного соединения во многом определяются его структурой. Анализ макроструктур при АрДЭС и ЭЛС показал, что ширина сварного шва и размер макрозерен после АрДЭС значительно больше, чем после ЭЛС (рис. 1).

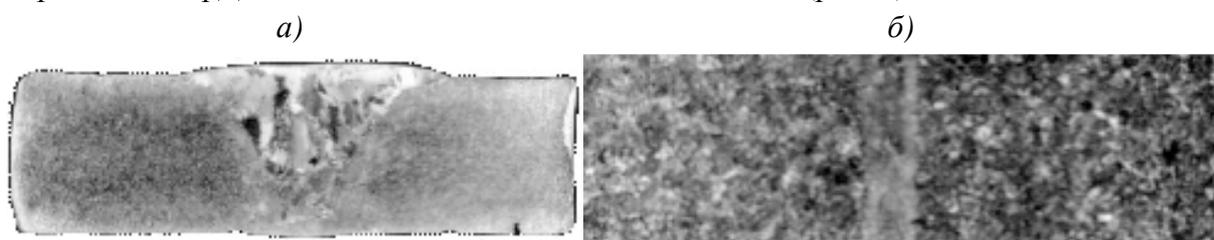


Рис. 1. Макроструктуры ( $\times 2$ ) сварного соединения сплава BT40L: *а* – АрДЭС; *б* – ЭЛС

При ЭЛС в микроструктуре шва и основного металла отливки наблюдается значительная разница. Размер зерна сварного шва на 2 балла меньше, чем у основного металла. Измельчение структуры сварного шва связано с высокой скоростью кристаллизации металла в зоне электронно-лучевой сварки, которая (скорость) значительно выше скорости кристаллизации литых заготовок в процессе заливки и охлаждения в форме (рис. 2).

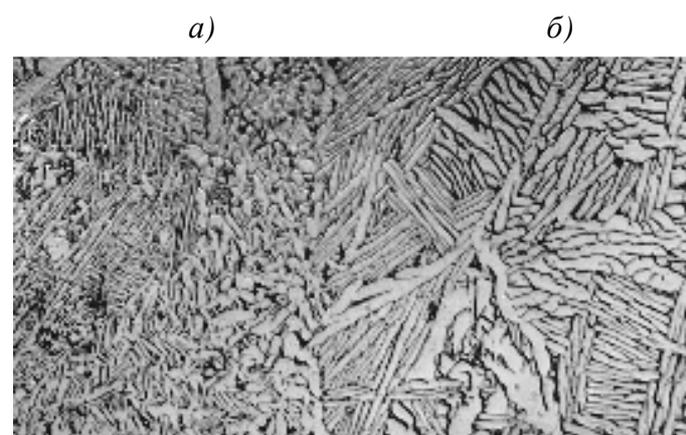


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 200$ ) сварного соединения сплава BT40L при ЭЛС:  
*а* – сварной шов; *б* – основной металл



Рис. 3. Литые детали из сплава BT40L

Технологические свойства (жидкотекучесть, заполняемость, усадка) сплава BT40L находятся на уровне свойств серийного литейного сплава BT20L. Из нового сплава для оценки его технологичности были отлиты отдельные детали (рис. 3). Отливку производили центробежным методом в графитовые формы, полученные по выплавляемым моделям.

Для использования сплава BT40L в производстве внесены дополнения в техническую документацию на химсостав сплава (ТУ1-92-184), технические требования на отливки (ОСТ1 90060), а также на изготовление отливок из титановых сплавов (ПИ 1.2.668).

Литейный высокопрочный титановый сплав BT40L рекомендован для изготовления точных отливок сложной формы, а также для применения в высоконагруженных сварнолитых конструкциях авиационно-космической и гражданской техники.