

ЛЕГКИЕ СПЛАВЫ

Е.Н. Тарасенко, Л.В. Проходцева, А. Г. Рудаков

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЙ ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ С ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ ДЛЯ ТОЧНОГО ФАСОННОГО ЛИТЬЯ

Титан как конструкционный материал обладает хорошим комплексом механических и эксплуатационных свойств, позволяющих применять его в различных отраслях промышленности. Одним из факторов, сдерживающих широкое применение титановых сплавов, является высокая стоимость титановых деталей, что связано с технологией их изготовления и достаточно высокой стоимостью применяемого сырья. Снижение себестоимости изделий предполагает разработку сплавов с использованием дешевого сырья, сплавов с высокими технологическими характеристиками, а также технологических процессов, обеспечивающих более высокую эффективность использования потребляемой энергии и материалов. Наиболее перспективно в части снижения цены создание экономнолегированных сплавов с повышенной технологичностью, так как для титана стоимость изготовления составляет большую часть общей стоимости деталей. Основными направлениями при разработке композиций экономнолегированных сплавов широкого применения являются:

- уменьшение содержания в сплаве дорогих и дефицитных легирующих элементов (V и др.);
- легирование дешевыми эвтектоидообразующими элементами (Fe, Cr);
- легирование с применением элементов внедрения (O, N).

К первой группе относятся высокотехнологичные титановые сплавы, содержащие небольшое количество ванадия (до 2–3% по массе), который повышает как прочностные свойства, так и характеристики пластичности, повышая способность α -фазы к пластической деформации за счет уменьшения соотношения осей c/a кристаллической решетки α -титана (Ti–3Al–2,5V и др.). Сплавы второй группы создавались как более дешевые аналоги сплава Ti–6Al–4V, не уступающие ему по механическим и технологическим свойствам (RMI Low cost, Ti–62S, Ti–5,5Al–1Fe и др.), а также с целью снижения стоимости высокопрочных высоколегированных титановых сплавов (TIMETAL LCB). В Японии разработаны сплавы серий TIX и Super TIX систем Ti–Fe–O–N и Ti–Fe–O–N (Ni, Cr) с кислородным эквивалентом $Q=0,34–1,0$, в которых алюминий заменен элементами внедрения (O, N), что позволило резко повысить технологичность и значительно снизить стоимость сплавов (TIX-80 и др.) [1].

В начале развития титановой промышленности в России был разработан ряд дешевых титановых сплавов, нашедших применение в гражданской технике: сплавы системы Ti–Al–Mg (OT4, OT4-1, OT4-0, BT4, OT4-2), комплексно-легированные сплавы AT3, AT4, AT6 системы Ti–Al(Cr, Fe, Si, B) [2], а также вторичные титановые сплавы (TB2 и др.), при выплавке которых использованы отходы первичных сплавов. Номенклатура экономнолегированных и вторичных сплавов полностью удовлетворяла запросы отраслей–потребителей, использовавших дешевые сплавы в качестве материалов с высокой коррозионной стойкостью, поэтому новые научные исследования в этом направлении не проводились. Все более высокие требования, предъявляемые к комплексу свойств изделий в различных отраслях промышленности, способствуют разработке и расширенному применению титановых сплавов различных классов при условии их ценовой конкурентоспособности по сравнению с традиционными материалами.

Применение комплексного микролегирования позволило разработать экономнолегированный литейный титановый сплав BT40Л ($[Mo]_{э\text{KB}} < 2,5$) системы Ti–Al (Mo, V, Fe, Zr, Si, O, C) с повышенной прочностью и долговечностью ($\sigma_b > 1050$ МПа; $\delta > 6\%$; $KCU > 30$ Дж/см²; $\sigma_{-1} > 400$ МПа), близкий по свойствам к деформированному материалу и получаемый без применения упрочняющей термической обработки, что обеспечивает из-

готовление геометрически точных отливок сложной формы благодаря отсутствию поволоков при высокотемпературной обработке. Композиция сплава позволяет получить требуемый уровень свойств при минимальном использовании дорогих легирующих элементов. Рис. 1 иллюстрирует место сплава ВТ40Л в номенклатуре литейных титановых сплавов на диаграмме в координатах «эквивалент алюминия – эквивалент молибдена», которые характеризуют склонность к выделению α_2 -фазы ($[Al]_{\text{экв}}$), степень легирования сплава β -стабилизирующими элементами и их влияние на мартенситное превращение ($[Mo]_{\text{экв}}$) [3].

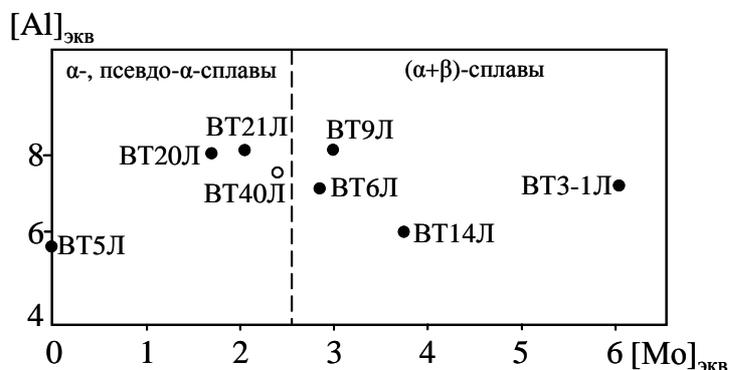


Рис. 1. Расположение литейных титановых сплавов (●) на диаграмме в координатах «эквивалент Al – эквивалент Mo»:

○ – опытный сплав

Комплексное микролегирование элементами замещения и внедрения обеспечивает дополнительное упрочнение сплава в результате взаимодействия легирующих компонентов между собой, лучшее сочетание прочностных свойств и пластичности и более высокие служебные характеристики при легировании несколькими однотипными элементами вместо введения одного элемента в той же суммарной концентрации. Кроме того, многокомпонентное микролегирование является одним из наиболее рациональных способов получения литейных сплавов, так как при малом содержании легирующих элементов менее развита зональная и внутрикристаллическая ликвация, что особенно важно для фасонного литья и производства слитков.

Использование в целях уменьшения ликвации специальных лигатур и высокая точность шихтовки сплава, благодаря контролю и учету содержания элементов замещения (Fe, Si) и внедрения (O, C) в титановой губке, обеспечили получение качественных слитков и отливок со стабильным химическим составом и с требуемыми механическими свойствами. Установлено, что литейные свойства (жидкотекучесть, заполняемость форм, усадка) нового сплава аналогичны свойствам высокотехнологичного сплава ВТ20Л.

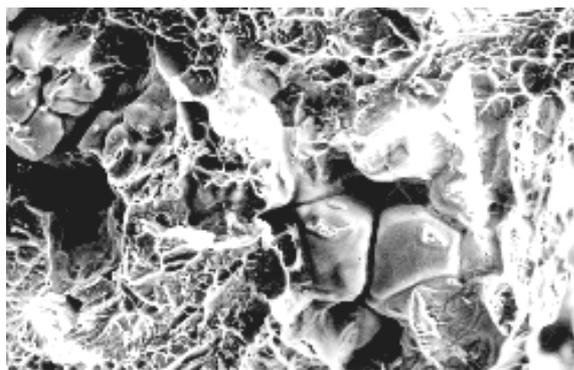


Рис. 2. Литейная пористость ($\times 400$) на сплаве ВТ40Л (без ГИП и ТО)

Фасонное литье является экономически эффективным способом формообразования для титана, но применение отливок ограничено пониженным по сравнению с деформируемым материалом уровнем механических свойств, особенно усталостной прочности, что связано с особенностями структуры литого металла (несплошности, крупнозернистость и др.). Характерной особенностью структуры литого металла, значительно снижающей усталостные характеристики, является наличие дефектов в виде несплошностей усадочного происхождения (раковины, рыхлоты, поры – рис. 2), для устранения которых используют горячее изостатическое прессование (ГИП).

В результате проведенных исследований установлено, что в целях качественного залечивания дефектов, предотвращения роста зерна и огрубления внутризеренной структуры сплава оптимальным является режим ГИП: $T = T_{\text{пл}} - (20-30)^\circ\text{C}$; $P \geq 1250$ ат; $\tau \geq 2$ ч ($T_{\text{пл}}$ –

температура полиморфного превращения). Механические свойства сплава ВТ40Л до и после ГИП приведены в таблице.

Влияние ГИП на механические свойства сплава ВТ40Л

Состояние материала	Температура испытания, °С	σ_B , МПа	δ	ψ	KCU	KCT	K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$	σ_{100}^{350} , МПа
			%		Дж/см ²			
Литье (без ГИП и ТО)	20	1070–1140	7,6–11,4	16–25	36–50	–	–	690
Литье + ГИП	-70	1340	7,3–8,5	14–21	–	–	–	–
	20	1110–1170	10,0–12,8	16–37	37–47	13–17	88–90	760
	350	790–855	10,7–12,7	26–40	–	–	–	–
	400	780–840	13,1–13,3	42	–	–	–	–

Известно, что пределы прочности и выносливости титановых сплавов зависят от содержания элементов (примесей) внедрения. Повышение содержания кислорода в пределах 0,02–0,3% увеличивает сопротивление усталости титана и его сплавов [4, 5]. Избыточное содержание кислорода сильно снижает усталостную прочность. Следовательно, увеличение содержания кислорода в определенных (допустимых) пределах является полезным, так как его атомы оказывают растворное упрочнение и повышают сопротивление движению дислокаций [3].

Корректировка химического состава сплава в части содержания элементов внедрения (O, C) и оптимизация технологических параметров изготовления (ГИП) позволили значительно повысить основные характеристики сплава ВТ40Л, при этом были превышены требования ТЗ по усталостной прочности (400 против 340 МПа). Усталостная прочность сплава (МнЦУ) при изгибе с вращением ($f=50$ Гц) определялась на гладких образцах и образцах с надрезом на базе $N=10^7$ циклов и составляла $\sigma_{-1}=400$ МПа ($K_f=1$) и $\sigma_{-1}^H=280$ МПа ($K_f=2,2$; $r_H=0,5$ мм) соответственно. Влияние ГИП на МнЦУ сплава при изгибе с вращением показано на рис. 3.

Очевидно, что применение горячего изостатического прессования позволяет повысить МнЦУ сплава в среднем на 60–80 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). На рис. 4 сопоставлены результаты определения МЦУ для сплавов ВТ40Л и ВТ20Л. Малоцикловая усталость сплава ВТ40Л на 25% превышает соответствующий показатель промышленного сплава ВТ20Л.

Одним из факторов, определяющих сопротивление усталости титановых сплавов, является тип и параметры макро- и микроструктуры. На рис. 5 показаны макро- и микроструктуры промышленных литейных титановых сплавов ВТ5Л, ВТ20 и нового сплава ВТ40Л.

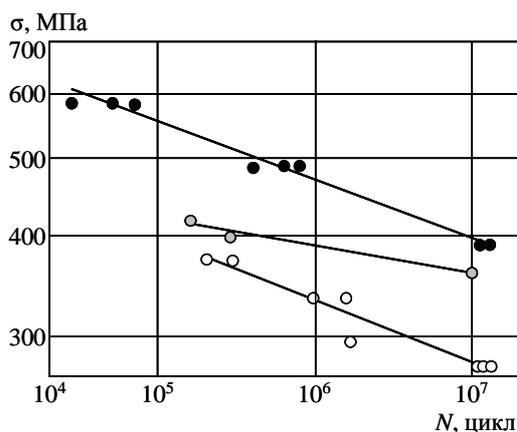


Рис. 3. Влияние ГИП (●, ○) на МнЦУ (при $f=50$ Гц) сплава ВТ40Л:

●, ○ – гладкие образцы ($K_f=1$); ○ – образцы с надрезом ($K_f=2,2$)

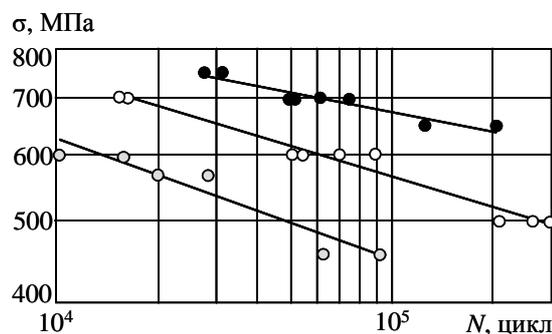


Рис. 4. Сравнение МЦУ сплавов ВТ40Л (●, ○) и ВТ20Л (○): ● – гладкие образцы ($K_f=1$); ○, ○ – образцы с надрезом ($K_f=2,2$)

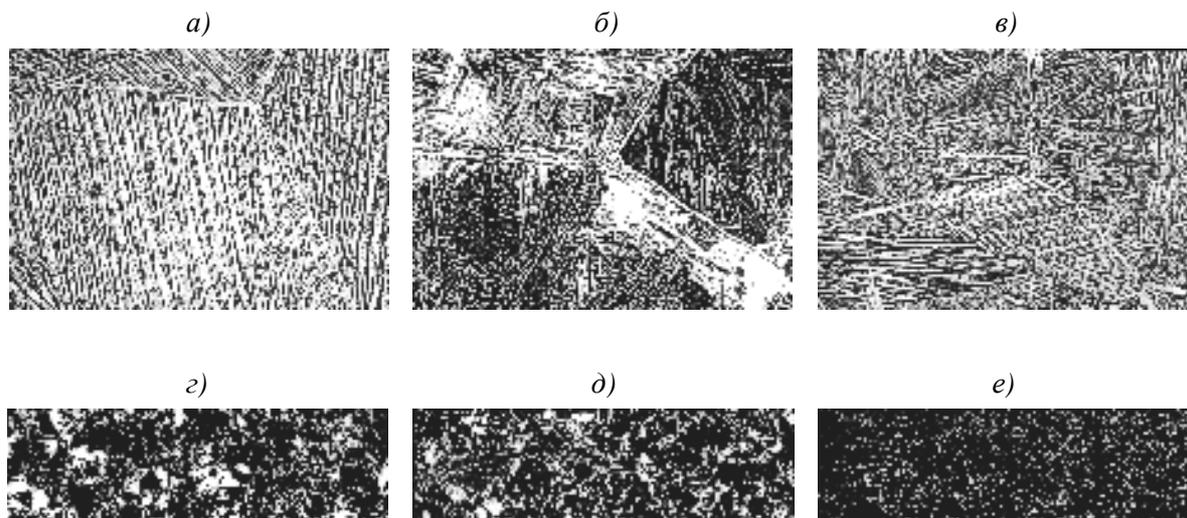


Рис. 5. Микро- и макроструктуры литейных титановых сплавов ВТ5Л ($a - \times 320$; $z - \times 4$); ВТ20Л ($b - \times 320$; $d - \times 4$); ВТ40Л ($e - \times 600$; $e - \times 4$)

Промышленные литейные титановые сплавы имеют однотипную крупнозернистую пластинчатую структуру с колониями параллельных α -пластин, сформированную в условиях значительного перегрева металла и низких скоростей кристаллизации и фазовой перекристаллизации в процессе охлаждения металла, что обуславливает пониженный общий уровень свойств по сравнению с деформируемым материалом [6]. Отличительной особенностью структуры этого типа являются пониженные значения характеристик прочности, пластичности, а также усталости ($\sigma_{-1}=220-240$ МПа) и времени до зарождения усталостной трещины. Литая структура, содержащая колонии α -пластин, повышает усталостную долговечность образца с надрезом, замедляя рост усталостной трещины вследствие высокого уровня работы ее распространения, но при этом общий уровень характеристик усталости литого металла по сравнению с деформированным остается низким. Пластинчатая структура обеспечивает более высокие значения вязкости разрушения (K_{Ic}), а пределы длительной прочности и ползучести литого металла с данным типом структуры сопоставимы (или выше) с аналогичными характеристиками деформированного материала.

При повышении степени легирования (увеличении содержания β -стабилизаторов) наблюдается измельчение макро- и микроструктуры, резко выраженное для сплава ВТ40Л (см. рис. 5), что характерно при переходе от псевдо- α - ($[Mo]_{эКВ} < 2,5$) к ($\alpha+\beta$)-сплавам ($[Mo]_{эКВ} \geq 2,5$). С уменьшением величины зерна сопротивление усталости титана и его сплавов возрастает. Сплав ВТ40Л в результате комплексного микролегирования имеет мелкозернистую пластинчатую структуру, обеспечивающую удовлетворительный комплекс механических и эксплуатационных свойств уже в исходном литом состоянии. Структура данного типа обеспечивает высокую прочность, пластичность и особенно усталостную прочность (340 против 220–240 МПа), увеличивая время до зарождения усталостной трещины, и сохраняет при этом достаточно высокие характеристики КСУ, КСТ, K_{Ic} и длительной прочности.

Вид излома титановых сплавов зависит от типа структуры и способа нагружения. Фрактографические особенности разрушения сплава ВТ40Л изучали на образцах, испытанных при ударном изгибе в литом состоянии и после выдержки при 350°C в течение 100 ч. Исследования показали, что при ударном однократном нагружении разрушение сплава в литом состоянии происходит с образованием ямочного рельефа различной степени пластичности: равноосных и вытянутых ямок, ямок цилиндрической формы со следами пластической деформации на стенках ямок (рис. 6, a, b).

Наблюдаемая неоднородность микростроения изломов связана с особенностями микроструктуры и характерна для литейных титановых сплавов. Микростроение изломов соответствует строению литейных сплавов с хорошими показателями вязкости раз-

рушения. В результате длительной выдержки образцов при повышенной температуре происходит незначительное снижение пластичности ямочного рельефа (рис. 6, в, з).

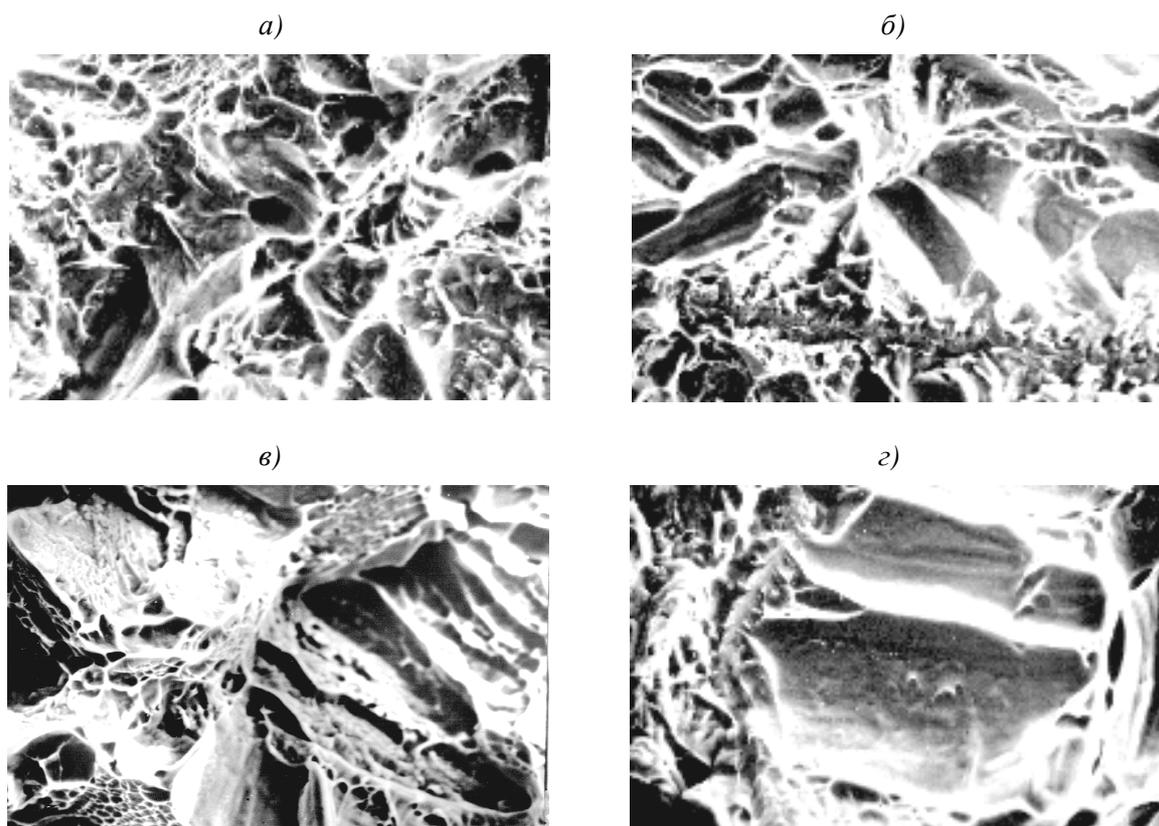


Рис. 6. Микростроение изломов образцов из сплава ВТ40Л, испытанных при ударном изгибе, в литом состоянии (а, б – $\times 1000$) и после выдержки при 350°C , 100 ч (в – $\times 1000$; з – $\times 1500$)

После выдержки при 350°C в течение 100 ч разработанный сплав ($[\text{Al}]_{\text{эКВ}} < 9\%$) имеет хорошую термическую стабильность: $\sigma_{\text{в}}=1120\text{--}1160$ МПа; $\delta=7,6\text{--}11\%$; $\psi=15,4\text{--}26,6\%$; $KCU=43\text{--}50$ Дж/см² против $\sigma_{\text{в}}=1110\text{--}1140$ МПа; $\delta=6,2\text{--}13,4\%$; $\psi=16,6\text{--}30,0\%$; $KCU=52\text{--}56$ Дж/см², – следовательно, микролегирование в определенных (допустимых) пределах элементами внедрения (O, C) не приводит к ее резкому снижению.

Новый литейный титановый сплав ВТ40Л относится к псевдо- α -сплавам, для которых основным видом термообработки является отжиг для снятия остаточных напряжений, образующихся в случае фасонного литья в процессе охлаждения металла в форме. Влияние режимов отжига на величину остаточных напряжений определяли на специальных пробах – кольцах Френча. Оценивали влияние нескольких факторов (рис. 7): температуры нагрева, продолжительности выдержки – и определяли изменение деформации в тонком сечении кольца Френча после разрезки.

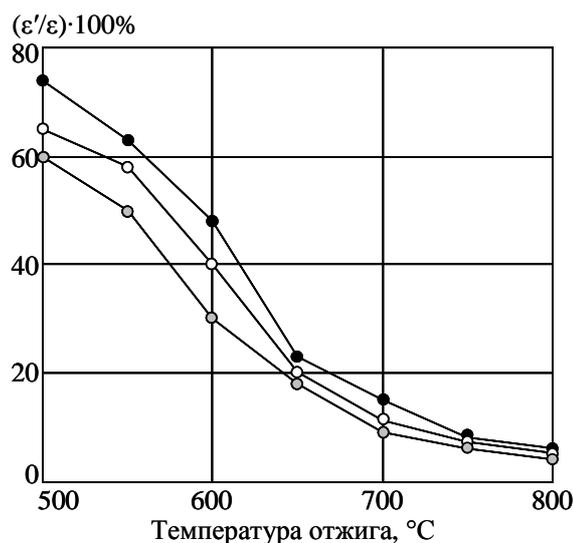


Рис. 7. Влияние режимов отжига на величину остаточных напряжений: продолжительность отжига 1 (●); 1,5 (○) и 2 ч (⊙)

Установлено, что для сложных полукольцевых деталей необходимо проводить полный отжиг в инертной среде при температуре 800°C с выдержкой 2 ч. Для отливок простой формы рекомендуется проводить неполный отжиг на воздухе при температуре 650°C с выдержкой 2 ч, снимающий до 80% остаточных напряжений. Оставшиеся напряжения на геометрию отливок не влияют, так как величина их очень мала.

Проведенные исследования показали, что экономнолегированный литейный сплав ВТ40Л имеет более высокий уровень гарантированных механических свойств, чем промышленные сплавы ВТ20Л и ВТ6Л (Ti-6Al-4V) (рис. 8), обеспечивает увеличение прочности на 20% ($\sigma_B > 1050$ МПа) по сравнению с серийными материалами, повышение усталостной прочности на 25% ($\sigma_{-1} > 400$ МПа, $N=10^7$ циклов) и снижение массы конструкции на 15–20%.

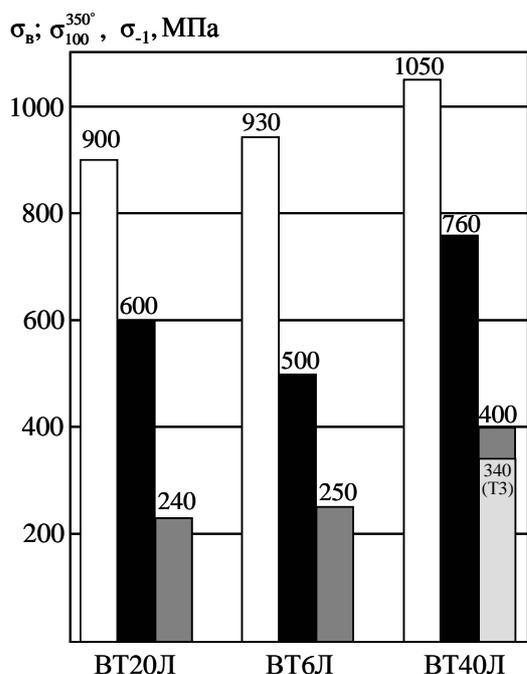


Рис. 8. Сравнение уровней гарантированных механических свойств (\square – σ_B ; \blacksquare – σ_{100}^{350} ; \blacksquare – σ_{-1}) литейных титановых сплавов



Рис. 9. Отливки из сплава ВТ40Л

Номенклатура отливок из сплава ВТ40Л показана на рис. 9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Titanium'95. Sci. and Technol. Proc. 8 World Conf. on Titanium 1995.– Birmingham (UK, London): The Institute of Materials, The University Press, Cambridge, 1996, v. 3, p. 1911–2914.
2. Titanium'99. Sci. and Technol. Proc. 9 World Conf. on Titanium 1999.– S-Petersburg (Russia): Prometeu, 1999, v. 1, p. 642.
3. Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран.– М.: ВИЛС, 2000, 316 с.
4. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроении.– М.: Машиностроение, 1977, 248 с.
5. Чечулин Б.Б., Хесин Ю.Д. Циклическая и коррозионная прочность титановых сплавов.– М.: Metallurgy, 1987, 208 с.
6. Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. Metallography титановых сплавов.– М.: Metallurgy, 1980, 464 с.