

УДК 669.295

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ НА
УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ПРУТКОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6**

Михонов В.В., студент гр. ТСО-401Б-21, IV курс,

Хажакян В.О., студент гр. ТСО-403Б-21, IV курс

Научный руководитель: Егорова Ю.Б., д-р техн. наук, профессор
Ступинский филиал ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
г. Ступино

Механические свойства полуфабрикатов из титановых сплавов сильно зависят от типа и параметров структуры [1]. Для равноосных (глобулярных) структур характерны высокие кратковременные прочностные свойства, максимальная пластичность при пониженных значениях вязкости разрушения и жаропрочности, повышенной скорости роста трещин. Пластинчатые структуры обеспечивают высокую вязкость разрушения, характеристики жаропрочности и сопротивления развитию трещин при пониженных значениях сопротивления усталости, прочности и особенно пластичности. Считается, что ударная вязкость титановых сплавов с пластинчатой структурой выше, чем с глобулярной [1, 2]. Наиболее обширные исследования по влиянию структурного фактора на механические свойства титановых сплавов были проведены в ВИЛС в 1980-х годах. Самым изученным стал сплав ВТЗ-1, который в СССР был одним из самых распространённых титановых сплавов. В настоящее время наблюдается тенденция его замены на более технологичные сплавы, в частности на сплав Ti-6Al-4V (ВТ6), который является наиболее популярным в мире титановым сплавом.

Проведенный анализ литературных сведений показал, что для сплава ВТ6 данные по влиянию структуры на ударную вязкость крайне недостаточны и неоднозначны, что может быть связано с влиянием колебаний химического состава и режимов термической обработки. Цель работы состояла в установлении статистических закономерностей совместного влияния химического состава и структуры на ударную вязкость отожженных прутков из титанового сплава ВТ6.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили катаные прутки промышленного производства диаметром 15-150 мм из $\alpha+\beta$ -сплава мартенситного класса ВТ6 (43 плавок). Степень легирования оценивали с помощью структурных эквивалентов по алюминию $[Al]_{\text{экв}}^{\text{стр}}$ и молибдену $[Mo]_{\text{экв}}^{\text{стр}}$ [1]:

$$[Al]_{\text{экв}}^{\text{стр}} = Al + Sn/3 + Zr/6 + 10 \cdot O + 10 \cdot C + 20 \cdot N,$$

$$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{стр}} = Mo + Nb/3,3 + W/2 + V/1,4 + Cr/0,6 + Mn/0,6 + Fe/0,4$$

где содержание легирующих элементов и примесей указано в % по массе.

Пластинчатые и глобулярные структуры были получены путем изменения режимов деформации и термической обработки. Прокатку проводили в разных температурных областях – ниже и выше температуры полиморфного превращения. Прутки были подвергнуты отжигу по различным режимам (600-920 °С, 20-180 мин, охлаждение на воздухе).

Испытания на ударный изгиб образцов с U-образным надрезом проводили при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 9454-78. Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе AXIO Observer.Alm (Karl Zeiss Jena, Германия). Анализ полученных изображений осуществляли с помощью программного комплекса NEXSYS ImageExpert Pro3.6. Статистический анализ был проведен с помощью ППП «STATISTICA» [4].

Результаты и их обсуждение

Пластинчатые структуры формируются в том случае, когда деформация начинается и заканчивается при температурах β -области, т.е. выше температуры полиморфного превращения. Пластинчатая структура представлена β -зернами, по границам которых может быть расположена оторочка из α -фазы. Внутреннее строение зерен состоит из пластин α -фазы и прослоек β -фазы (или из смеси α - и β -фаз). Пластины α -фазы могут быть образовывать α -колонии с одинаковой ориентацией α -пластин. Основными параметрами пластинчатой структуры являются размеры β -зерен и α -колоний, а также толщина α -пластин.

Глобулярная (равноосная) структура была сформирована деформацией при температурах $\alpha+\beta$ -области, т.е. ниже температуры полиморфного превращения. Глобулярная структура характеризуется частицами α -фазы, форма которых близка к сферической (равноосной) или немного вытянутой. Между частицами расположена прослойка β -фазы (или смесь α - и β -фаз). Основным параметром глобулярной структуры является толщина (диаметр) частиц α -фазы. По данными микроструктурного анализа прутков толщина α -пластин составила $b_\alpha = 2,0-5,5$ мкм, а диаметр α -частиц $a_\alpha = 2,1-9,3$ мкм

В табл. 1 приведены механические свойства отожженных прутков из сплава ВТ6 с различной структурой. Общий разброс предела прочности составляет 320 МПа, а ударной вязкости – 1,0 МДж/м². Это обусловлено влиянием не только структурного фактора (типа и параметров структуры), но и диаметра прутков, режимами отжига, а также колебаниями химического состава, которые в перерасчете на эквиваленты по алюминию и молибдену составляют 2,5% (масс.) и 1,6 % (масс.) соответственно. Суммарный разброс химического состава достигает $[Al]_{\text{экв}}^{\text{стп}} + [Mo]_{\text{экв}}^{\text{стп}} = 4,0$ % (масс.).

На рис. 1 сопоставлены зависимости ударной вязкости прутков диаметром 10-60 мм из сплава ВТ6 с разной структурой от суммы структурных эквивалентов по алюминию и молибдену. С увеличением степени легирования $[Al]_{\text{экв}}^{\text{стп}} + [Mo]_{\text{экв}}^{\text{стп}}$ с ~10,0 до 13,5 % (по массе) наблюдается снижение ударной вязкости и для пластинчатой, и для глобулярной структуры.

Таблица 1 – Механические свойства отоженных прутков диаметром 15-150 мм сплава ВТ6 в зависимости от типа структуры (в числителе диапазон, в знаменателе – среднее)

Тип и параметры структуры	Число и доля образцов	Диаметр прутка, мм	$[Al]_{экв}^{стр}, \%$	$[Mo]_{экв}^{стр}, \%$	КСУ, МДж/м ²
глобулярная	103	16-90	$\frac{7,3-9,2}{8,6}$	$\frac{3,0-4,1}{3,3}$	$\frac{0,31-0,92}{0,49}$
пластинчатая	45	20-155	$\frac{7,2-9,3}{8,1}$	$\frac{2,9-4,4}{3,3}$	$\frac{0,49-1,14}{0,8}$
ОСТ1 90173-75		10-60	-	-	$\geq 0,4$
ОСТ1 90266-86		65-100	-	-	$\geq 0,3$
ОСТ1 90266-86		≥ 110	-	-	$\geq 0,3$

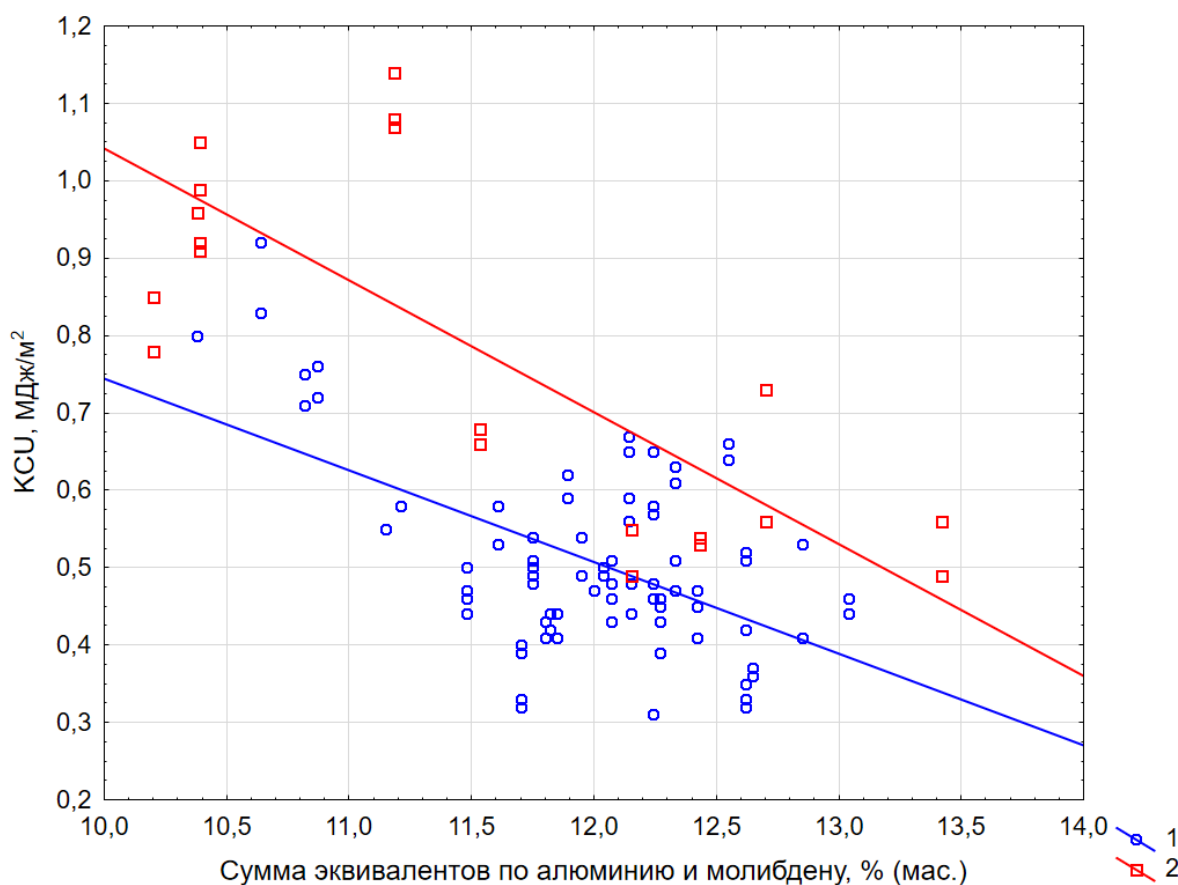


Рисунок 1 – Зависимость ударной вязкости прутков Ø 15-60 мм из сплава ВТ6 с разной структурой от суммы эквивалентов по алюминию и молибдену:
1 – глобулярная структура, 2 – пластинчатая структура.

При одинаковых эквивалентах прутки с пластинчатой структурой имеют более высокие значения ударной вязкости (на $\sim 0,2 \div 0,3$ МДж/м²) по сравнению с глобулярной структурой. Разный уровень механических свойств

связан с различиями в механизме деформации, зарождения трещины, ее распространения и разрушения. В глобулярной структуре трещина зарождается труднее, но легче распространяется, а в пластинчатой – наоборот [1-3]. Образцы с пластинчатой структурой имеют более высокую ударную вязкость по сравнению с глобулярной, что объясняют ветвлением растущей трещины, при этом тратится значительная работа разрушения. При глобулярной структуре магистральная трещина распространяется более легко и почти без ветвления, что приводит к снижению работы разрушения [2, 3].

Ударная вязкость прутков с пластинчатой структурой полностью удовлетворяет требованиям ОСТ 1 90173-75 ($\geq 0,4$ МДж/м²), в то время как для глобулярной структуры встречаются значения КСЧ, которые лежат ниже нормативных требований. Это может быть связано с совместным влиянием размера α -глобулей и химического состава. С увеличением размера частиц α -фазы с 2,1 до 9,3 мкм наблюдается рост ударной вязкости. Проведенный анализ показал, что если размер глобулей менее 5,0-6,0 мкм, а сумма эквивалентов по алюминию и молибдену более 11,5% (по массе), то прутки сплава ВТ6 с глобулярной структурой могут иметь ударную вязкость, не удовлетворяющую нормативным требованиям.

Вместе с тем следует иметь в виду, что пластинчатые структуры приводят к пониженной прочности, пластичности и циклической выносливости [1-3, 5]. Поэтому для того, чтобы обеспечить требуемый уровень различных механических свойств полуфабрикатов, целесообразно формирование бимодальной (глобулярно-пластинчатой) структуры, состоящей из равноосных частиц первичной α -фазы и пластин β -фазы с прослойками вторичной α -фазы [1, 6].

Выводы:

1. На основе экспериментальных данных проведен анализ статистических закономерностей совместного влияния химического состава, типа и параметров структуры на ударную вязкость отожженных прутков из титанового сплава ВТ6.

2. Выявлена зависимость ударной вязкости прутков $\varnothing 10-60$ мм из сплава ВТ6 с разной структурой от суммы эквивалентов по алюминию и молибдену после простого отжига. С увеличением степени легирования с $\sim 10,0$ до 13,5% (по массе) наблюдается снижение ударной вязкости и для пластинчатой, и для глобулярной структуры.

3. При одинаковых эквивалентах прутки с пластинчатой структурой имеют более высокие значения ударной вязкости (на $\sim 0,2 \div 0,3$ МДж/м²) по сравнению с глобулярной структурой.

4. Установлено, что если размер глобулей менее 5,0-6,0 мкм, а сумма эквивалентов по алюминию и молибдену более 11,5% (по массе), то прутки сплава ВТ6 с глобулярной структурой могут иметь ударную вязкость, не удовлетворяющую нормативным требованиям.

5. Ударная вязкость прутков сплава ВТ6 с пластинчатой структурой полностью удовлетворяет требованиям ОСТ 1 90173-75 ($\geq 0,4$ МДж/м²).

Список литературы:

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. 520 с.
2. Полуфабрикаты из титановых сплавов. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. М.: Металлургия, 1979 - 512 с.
3. Полуфабрикаты из титановых сплавов. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белозеров А.П. и др. М.: ВИЛС, 1996 - 581 с.
4. Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере. М.: Финансы и статистика, 2006. 368 с.
5. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Челпанов А.В., Каратаева Е.С. Влияние структуры на механические свойства прутков из титанового сплава ВТ6 // МИТОМ, 2024, №6, с. 10-17. DOI: 10.30906/mitom-2024-6-10-17
6. Егорова Ю.Б., Скворцова С.В., Давыденко Л.В., Гвоздева О.Н. Статистическое исследование механических свойств прутков из сплава ВТ6 с глобулярно-пластинчатой структурой // Металлург, 2024, №1, с. 64-68. DOI: 10.52351/00260827_2024_1_64