

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«Ковровская государственная технологическая академия  
имени В.А.Дегтярева»**

***Кратковременные механические свойства  
титановых сплавов. Вязкость разрушения и  
жаропрочность титановых сплавов. Подбор  
инструмента и режимов резания при обработке  
титановых сплавов***

# Механические свойства сплавов на разной основе

Рассмотрим механические свойства титановых сплавов при испытаниях на растяжение гладких образцов.

Прочностные свойства при растяжении ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов меньше аналогичных свойств при сжатии. В этом отношении свойства титановых сплавов аналогичны свойствам низколегированных сталей, но существенно отличаются от свойств алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей, у которых предел текучести на сжатие отс меньше, чем при растяжении отр.

Свойства	Сплавы			
	алюминиевые		титановые	Низколегированная сталь
	2024-T3	7075-T6	Ti-6Al-4V	41300
$\sigma_B$ , МПа	440,0	537,0	924,0	1380,0
$\sigma_{тр}$ , МПа	325,0	482,0	868,0	1213,0
$\sigma_{тс}$ , МПа	270,0	475,0	917,0	1248,0
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,8	2,8	4,43	7,8
$\sigma_B/\rho$ , м · 10 <sup>3</sup>	16,1	19,6	21,3	17,9
$\sigma_{тр}/\rho$ , м · 10 <sup>3</sup>	11,8	17,6	20,0	15,8
$\sigma_{тс}/\rho$ , м · 10 <sup>3</sup>	9,8	17,3	21,1	16,2

# *Механические свойства сплавов на разной основе*

Для изготовления силовых конструкций предпочтительнее материалы, у которых  $\sigma_{\text{тс}} > \sigma_{\text{тр}}$ . То есть титановые сплавы являются идеальным конструкционным материалом.

Для сплава Ti-6Al-4V указанное преимущество сохраняется в отожженном, закаленном и состаренном состояниях. Такая закономерность характерна для ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов.

Ударная вязкость – свойство, которое входит в технические условия на титановые сплавы в отечественных исследованиях. В зарубежных стандартах требования по ударной вязкости не приводятся.

Механические свойства титановых сплавов сильно зависят от типа и параметров микроструктуры.

# *Механические свойства деформируемых титановых сплавов*

Механические свойства деформируемых титановых сплавов приведены в табл. Данные таблиц сгруппированы по видам деформированных полуфабрикатов (прутки, листы, плиты и т.д.)

## **Механические свойства прутков из сплавов ВТЗ-1 и ВТ8, полученных по обычной технологии и в изотермических**

Сплав	Полуфабрикат	Термическая обработка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
ВТ-8	Катаный пруток $\varnothing 25$ мм	Отжиг 920° С+590°С	1103	18	42,5	41
	Изотермическое прессование, пруток $\varnothing 25$ мм	То же	1149	16,5	53	40
ВТЗ-1	Катаный пруток $\varnothing 35$ мм	Отжиг 870°С →590°С	1093	18,5	49,5	42
	Изотермическое прессование, пруток $\varnothing 17$ мм	То же	1147	17,0	50,0	42

# *Механические свойства деформируемых титановых сплавов*

## **Механические свойства лопаток из сплава ВТ6**

<b>Вид деформации</b>	<b><math>\sigma_B</math>, МПа</b>	<b><math>\delta</math>, %</b>	<b><math>\psi</math>, %</b>	<b>КСУ, Дж/см<sup>2</sup></b>
Обычная объемная штамповка	980	15	48	60
Изотермическая штамповка	1000	15,6	42	42
Высокоскоростная штамповка	1050	15	50	45

Механические свойства титана см. стр 172-251 Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник.-М.:ВИЛС-МАТИ, 2009.-520 с.

# *Механические свойства титановых сплавов*

Наиболее важные факторы, влияющие на разработку технологии и выбор режимов обработки титановых сплавов:

*Низкая теплопроводность титана и его сплавов практически в 15 раз ниже, чем у алюминия и его сплавов, и примерно в 5 раз ниже, чем у железа и сталей. Значения теплопроводности, теплоемкости, плотности титана и его сплавов таковы, что их температуропроводность – наиболее важная характеристика многих процессов теплообмена – примерно в 15 раз ниже, чем у алюминиевых сплавов, и в 3,5 раза меньше, чем у сталей.*

Следствием этого являются значительные перепады температур по сечению слитков и заготовок при нагреве и возникновение значительных термических напряжений, которые могут приводить к образованию трещин. Это обуславливает ограничение скоростей нагрева, особенно слитков и заготовок большого размера. При неблагоприятном выборе режимов индукционного нагрева слитков возможно даже расплавление подповерхностных слоев и выплескивание жидкого металла при последующей деформации.

# *Механические свойства титановых сплавов*

При охлаждении заготовок из титана и его сплавов из-за значительного градиента температур наблюдается быстрое захлаживание острых углов, тонких элементов сечений заготовок, что сильно затрудняет обеспечение равномерной деформации и может приводить к растрескиванию металла.

Возможно и местное захлаживание деформируемого металла в зонах контакта его с инструментом, имеющим значительно более низкую температуру. Эта особенность сплавов титана существенно ограничивает возможную конфигурацию элементов сечений промежуточных заготовок и готовых изделий, способы и скорость подачи нагретых полуфабрикатов на деформацию, выбор деформирующего оборудования.

Низкая теплопроводность оказывает отрицательное влияние и на процесс горячей деформации. Наличие зон наиболее интенсивной деформации при малой теплопроводности приводит к значительному перегреву металла этих зон вследствие теплового эффекта деформации и к ухудшению структуры и свойств.

# *Механические свойства титановых сплавов*

## *Высокая химическая активность титана и его сплавов*

Титан и его сплавы при температурах нагрева для горячей деформации, термической обработки и особенно в жидком состоянии при литье активно взаимодействуют с кислородом, азотом и другими газами атмосферы. При нагреве на воздухе на поверхности заготовок образуется окалина, начинающая отслаиваться при температурах выше 900 °С. Наряду с образованием окисной пленки происходит диффузия кислорода и азота вглубь металла с образованием поверхностного газонасыщенного слоя, имеющего высокую твердость и низкую пластичность. Наличие газонасыщенных слоев значительной толщины (до нескольких миллиметров на поверхности крупных слитков) может приводить к поверхностным надрывам при деформации, ухудшению качества поверхности. Готовые листы, профили, трубы и другие полуфабрикаты имеют вследствие этого пониженные показатели пластичности при испытаниях на разрыв, изгиб. Недостаточно полное удаление газонасыщенного слоя с отходов перед их вовлечением в шихту способствует местному или общему загрязнению выплавляемых слитков примесями внедрения, в первую очередь –кислородом.

# *Механические свойства титановых сплавов*

*Полиморфное  $\alpha\beta$ -превращение.* Практически во всех титановых сплавах, за исключением термически стабильных  $\beta$ -сплавов, при нагреве наблюдается полиморфное превращение низкотемпературной  $\alpha$ -модификации титана с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой в высокотемпературную  $\beta$ -модификацию с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой и обратный переход при охлаждении. Температура полного полиморфного превращения  $\alpha+\beta \rightarrow \beta$  для большинства промышленных титановых сплавов находится в интервале 750–1020 °С и зависит от содержания и типа легирующих элементов и примесей ( $\alpha$ - или  $\beta$ -стабилизаторы).

Нагрев в однофазную  $\beta$ -область и дальнейшее повышение температуры сопровождается значительным повышением пластичности, особенно при деформации литого металла, и снижением сопротивления деформации. Однако в большинстве случаев деформация в  $\beta$ -области не дает возможности получить структуру с высокими эксплуатационными свойствами из-за интенсивного роста зерна и грубого внутризеренного строения.

Оптимальная структура может быть получена при деформации в  $(\alpha+\beta)$ -области, но при этом снижается пластичность и возрастает сопротивление деформированию металла.

# *Механические свойства титановых сплавов*

*Ограниченные возможности холодной деформации титановых сплавов.* Несмотря на то, что титан обладает значительно большей способностью к холодной деформации, чем другие металлы с гексагональной кристаллической структурой, например магний, кадмий, цинк, проведение холодной деформации большинства титановых сплавов при таких технологических процессах, как прокатка, волочение, правка и листовая штамповка, связано со многими трудностями. Средне- и высоколегированные двухфазные ( $\alpha+\beta$ )-сплавы практически не поддаются холодной деформации из-за высокого сопротивления деформации, интенсивного деформационного упрочнения и склонности к растрескиванию и разрывам.

Даже малолегированные сплавы имеют пластичность при холодной прокатке в 2–3 раза меньшую, чем нержавеющие стали.

Для титановых сплавов характерно повышенное значение отношения предела текучести к модулю упругости и, как следствие этого, большая упругая отдача (пружинение) деформируемого металла.

Вместе с тем даже незначительный подогрев (до 200–300 °С) существенно снижает сопротивление деформации (для некоторых сплавов на 40–50 %), повышает пластичность, резко уменьшает пружинение металла.

# *Механические свойства деформируемых титановых сплавов*

Деформированные полуфабрикаты обладают более или менее ярко выраженной анизотропией свойств. В таблицах приведены свойства образцов в продольном направлении.

Механические свойства титановых сплавов сильно зависят от типа и параметров макро- и микроструктуры. При этом наблюдаются следующие закономерности:

- Временное сопротивление разрыву после  $\beta$ -деформации и  $\beta$ -термообработки несколько меньше, чем после деформации и обработки в  $(\alpha+\beta)$ -области;
- Удлинение (особенно поперечное сужение) после деформации и термообработки в  $\beta$ -области меньше, чем после проведения этих операций в  $(\alpha+\beta)$ -области.

Деформация в изотермических условиях обеспечивает высокую равномерность течения металла, существенное снижение усилий деформации, повышение коэффициента использования металла, уменьшение объема механической обработки. При этом формируется более однородная качественная структура, что сопровождается улучшением качества механических свойств. Сопротивление усталости повышается на 10-20%.

# *Механические свойства деформируемых титановых сплавов*

При скоростной штамповке наблюдается существенное повышение пластичности деформируемого металла, что обусловлено протеканием пластической деформации при более высоких температурах из-за сокращения тепловых потерь и большого теплового эффекта деформации. Также понижается контактное трение и усиливается действие инерционных сил. Уровень прочностных свойств повышается. Прочность и пластичность немного снижаются с увеличением габаритов деформированных полуфабрикатов, так как ухудшается степень их проработки пластической деформацией.

# *Механические свойства деформируемых титановых сплавов при криогенных температурах*

Титановые сплавы применяют не только при нормальной и повышенных, но и пониженных, включая криогенные температурах. С понижением температуры прочностные свойства титановых сплавов увеличиваются, а пластические - понижаются. Этот эффект в наибольшей степени проявляется для псевдо- $\beta$ -сплавов, в меньшей степени для  $(\alpha+\beta)$ -сплавов и слабее всего для  $\alpha$ -сплавов.

## **Температура перехода в хрупкое состояние**

	<b>псевдо-<math>\beta</math>-сплавы</b>	<b><math>(\alpha+\beta)</math>-сплавы</b>	<b><math>\alpha</math>-сплавы</b>
Температура	~200 К	77 К (температура жидкого азота)	20 К (температура жидкого кислорода)
Сплав	-	BT23	Ti-5Al-3Sn

# *Механические свойства деформируемых титановых сплавов*

Свойства титановых сплавов существенно зависят от технологии обработки давлением, режимов термической обработки, от колебания содержания легирующих элементов и примесей в пределах технических условий, типа и параметров микроструктуры и других трудноучитываемых факторов, таких как применяемое для обработки давлением оборудование.

Для сплавов ВТ14, ВТ3-1, ВТ23 и ВТ22 характерна тенденция к снижению относительного удлинения, поперечного сужения и ударной вязкости с повышением прочности сплава.

# *Литейные свойства титана и его сплавов*

Титан и его сплавы обладают хорошими литейными свойствами - высокой жидкотекучестью, малой склонностью к газовой пористости, небольшой линейной и объемной усадкой (2–3 %). В то же время титан имеет высокую химическую активность в расплавленном состоянии, что приводит к его загрязнению примесями, снижающими пластичность и вязкость металла в процессе плавки и при взаимодействии с материалом тигля и формы. Поэтому при фасонном литье возникают проблемы, во-первых, с разработкой способов плавки в защитных атмосферах, во-вторых, с выбором материала для форм и тиглей. В настоящее время первая проблема практически решена за счет использования вакуумной дуговой гарнисажной плавки.

Номенклатура литейных титановых сплавов включает в основном те же сплавы, что и для обработки давлением.

По некоторым показателям механических свойств литой титан превосходит деформированный, по другим – уступает ему. Это различие в свойствах определяется в основном более крупным зерном в литых деталях и наличием неразрушенной сетки межкристаллитного вещества, что снижает эффективность упрочняющей термической обработки. В случае работы при повышенных температурах литой материал будет иметь более высокую жаропрочность и сопротивление ползучести, чем деформированный.

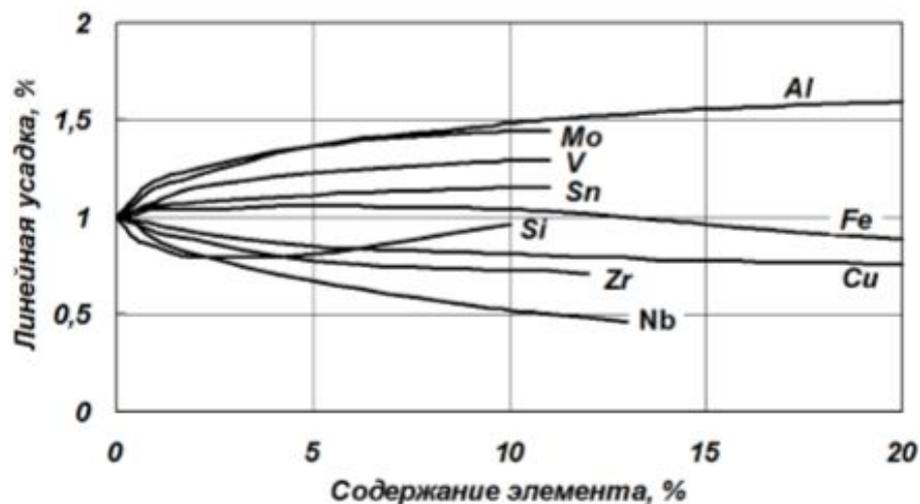
# *Литейные свойства титана и его сплавов*

Олово, цирконий, молибден и ниобий мало влияют на жидкотекучесть титана, а кремний, марганец, медь и хром ухудшают ее и пока не приближаются к эвтектическим концентрациям, где она начинает расти. Увеличение интервала кристаллизации заметно ухудшает жидкотекучесть сплавов. С другой стороны, огромное значение для жидкотекучести играет теплота кристаллизации: чем она больше, тем жидкотекучесть выше. Поэтому вполне естественно повышение жидкотекучести при введении алюминия, который увеличивает теплоту кристаллизации с 320 (чистый титан) до 430 кДж/кг (сплав Ti–10 % Al) при незначительном расширении интервала кристаллизации.

В ходе изучения зависимости вязкости титана от температуры установлено, что при повышении температуры с 1690 до 2100 °С вязкость титана снижается в семь раз (с 1,01 до 0,15 м<sup>2</sup>/с). Это должно существенно повышать заполняемость формы. Однако использование этого технологического фактора на практике ограничено из-за резкого повышения химического взаимодействия расплавленного титана с материалом формы, в результате чего в отливках возникают поверхностные и внутренние дефекты (пригар, пористость).

# Литейные свойства титана и его сплавов

Легирующие элементы по-разному влияют на процессы усадки. На рисунке приведены графики влияния легирующих элементов на линейную усадку, которая увеличивается с увеличением интервала кристаллизации. Линейная усадка литейных титановых сплавов колеблется в пределах 0,85–1,2 %, а объемная – 2,4–3,2 %. Макроструктура отливок титана и его сплавов аналогична образующейся при кокильном литье других металлов и сплавов: от стенок кристаллизатора растут столбчатые кристаллы, а в центре образуются равноосные зерна.



Влияние легирующих элементов на линейную усадку титана [1]

# *Литейные свойства титана и его сплавов*

Микроструктура титановых отливок подобна микроструктуре титановых штамповок, прошедших деформацию в  $\beta$  -области. Главными особенностями структуры отливок являются крупнозернистость, пластинчатая внутризеренная структура  $\alpha$  - и  $(\alpha+\beta)$  -сплавов и игольчатое строение сплавов с термически нестабильной  $\beta$  -фазой. Крупнозернистость является следствием малого изменения объема при  $\alpha \rightarrow \beta$  -превращении, что не вызывает измельчения зерна при фазовой перекристаллизации, как в стали, из-за практического отсутствия фазового наклепа.

В двухфазных  $(\alpha+\beta)$  -титановых сплавах пластинчатое строение обуславливается наличием  $\beta$  -фазы, сохраняющейся по границам  $\alpha$  -пластин. Значительное увеличение скорости кристаллизации титановых сплавов приводит к фиксации структур мартенситного типа или типичных дендритных структур. При фасонном литье в керамические формы нередко наблюдается загрязнение кислородом и другими газами поверхностных слоев отливок. Это вызывает образование твердого газонасыщенного слоя, затрудняющего мехобработку и снижающего надежность отливок.

# *Вязкость разрушения титановых сплавов*

Свойства титановых сплавов существенно зависят от технологии обработки давлением, режимов термической обработки, от колебания содержания легирующих элементов и примесей в пределах технических условий, типа и параметров микроструктуры и других трудноучитываемых факторов, таких как применяемое для обработки давлением оборудование.

Для сплавов ВТ14, ВТ3-1, ВТ23 и ВТ22 характерна тенденция к снижению относительного удлинения, поперечного сужения и ударной вязкости с повышением прочности сплава.

Вязкость разрушения – это работа, которую надо потратить на образование новой поверхности трещины единичной площади или продвинуть фронт трещины единичной длины на единичное расстояние.

Вязкость разрушения связана простым соотношением с коэффициентом интенсивности разрушений  $K$ :

- Для плоского напряженного состояния

$$G = K^2 / E$$

- Для условий плоской деформации

$$K^2 = EG(1 - \nu^2)$$

Где  $E$  – модуль нормальной упругости,  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

# *Вязкость разрушения титановых сплавов*

Экспериментально определяют коэффициент интенсивности разрушений, именно его и называют вязкостью разрушения. В линейной теории упругости коэффициент интенсивности напряжений описывается соотношением:

$$K = \sigma (\pi l)^{1/2} Y$$

где  $\sigma$  - среднее приложенное напряжение,  $l$  - половина длины трещины,  $Y$  – безразмерный функционал, зависящий от размера образца, длины и формы исходной трещины, ее расположения в образце, пластически деформированного объема в вершине трещины, схемы нагружения при испытаниях.

Вязкость разрушения зависит от направления вырезки образцов и ориентации трещины. Анизотропия вязкости разрушения особенно сильно выражена при хорошо развитой текстуре деформации.

Вязкость разрушения титановых сплавов определяется их химическим составом, пределом текучести, типом и параметрами структуры.

С повышением температуры отжига вязкость разрушения повышается. Этот эффект усиливается, если после охлаждения на воздухе производить старение.

# *Вязкость разрушения титановых сплавов*

Наилучшим комплексом свойств обладают сплавы с бимодальной (смешанной) структурой. При такой структуре сплавы имеют высокую вязкость разрушения, циклическую выносливость, пластичность. Тонкая бимодальная структура не обеспечивает более высокой вязкости разрушения по сравнению с пластинчатой структурой.

Пластинчатые структуры обеспечивают большую вязкость разрушения только в условиях плоской деформации.

Вязкость разрушения повышается с уменьшением содержания кислорода.

Вязкость разрушения каждого конкретного сплава определяется уровнем его прочностных характеристик и типом структуры. Предел текучести  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов, за исключением жаропрочных, обычно не превышает 850 МПа. Сопротивление этих сплавов разрушению достаточно высокое и разрушение при плоской деформации не наблюдается.

Прочность и вязкость  $(\alpha+\beta)$ -сплавов колеблется в весьма широких пределах.

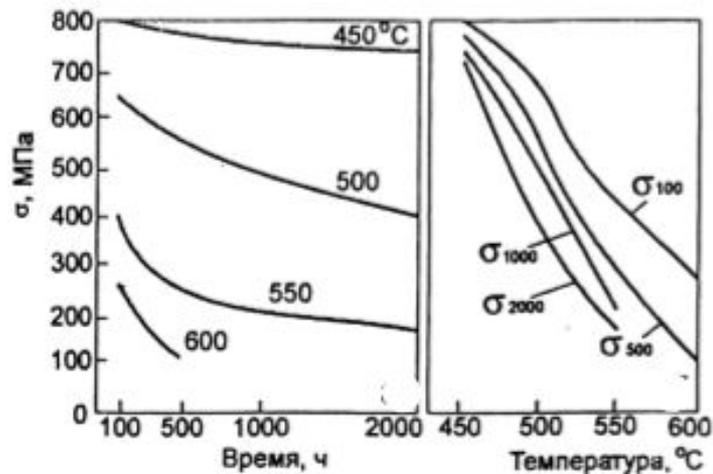
# *Жаропрочность титановых сплавов*

*Жаропрочность* – это способность металлов и сплавов работать под напряжением в условиях повышенных температур без заметной остаточной деформации и разрушения. Длительная прочность и ползучесть – основные характеристики жаропрочности. Предел длительной прочности характеризует условное напряжение, под действием которого материал при заданной температуре разрушается через определенный промежуток времени. Предел ползучести – это условное растягивающее напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенное время достигают заданной величины.

Длительную прочность оценивают по результатам испытаний при разных температурах, при которых образцы нагружаются постоянными напряжениями до разрушения и затем строят кривые длительной прочности

# Жаропрочность титановых сплавов

Анализ этих кривых позволяет определить предел длительной прочности за соответствующий промежуток времени – 100, 200 часов ( $\sigma_{100}$ ,  $\sigma_{200}$ ) и т. д.



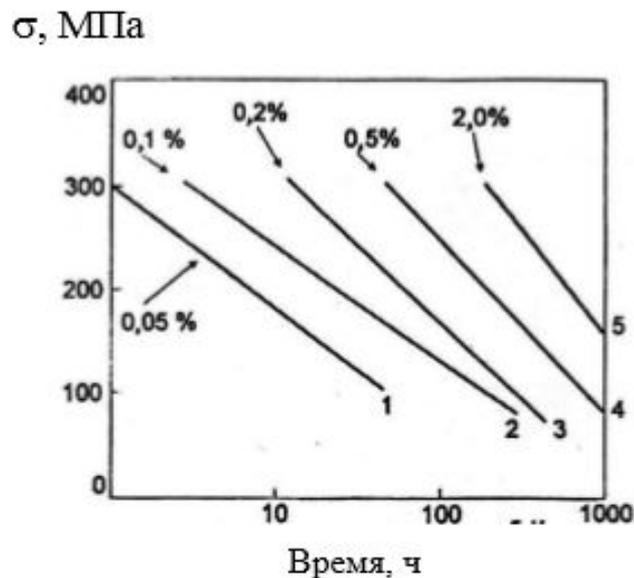
а

б

Кривые длительной прочности сплава ВТ9 при разных температурах испытания (а) и зависимость предела длительной прочности от температуры при базе испытаний 100, 500, 1000, 2000 ч (б)

# Жаропрочность титановых сплавов

По кривым ползучести определяется предел ползучести, но в этом случае измеряется не разрушающее напряжение, а заданная величина деформации. Обычно за предел ползучести принимается напряжение, соответствующее деформации 0,2 % за заданное время, например, 100 ч, 1000 ч ( $\sigma_{0,2/10^0}$ ,  $\sigma_{0,2/1000}$ ).



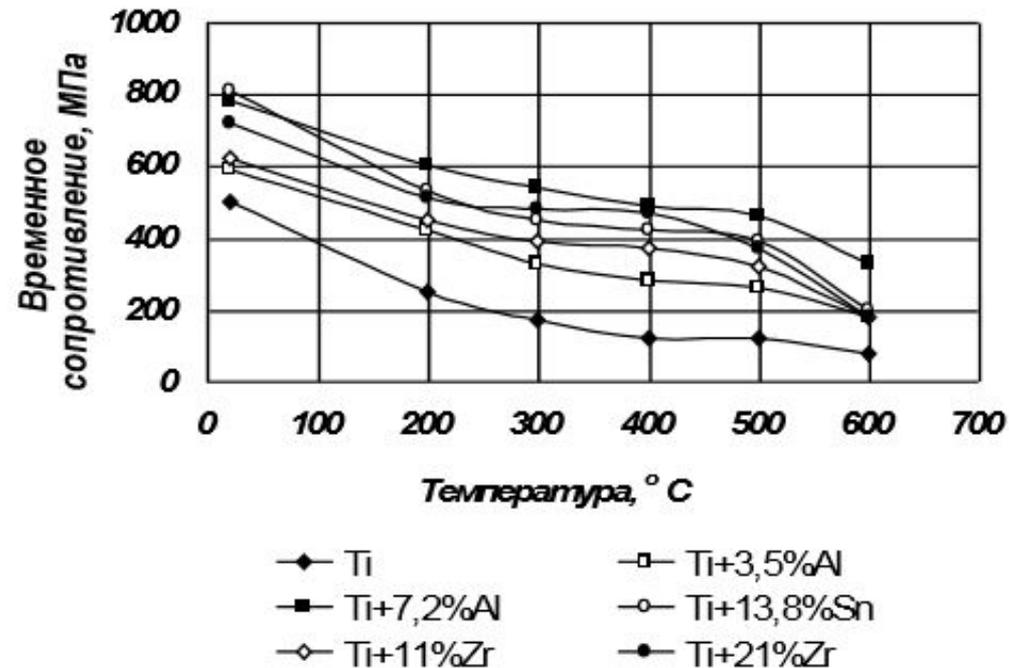
Кривые ползучести сплава IMI 679 (Ti-11Sn-5Zr-2,3Al-1Mo-0,2Si) при 540°  
C, в %: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,5; 5 – 2

# *Жаропрочность титановых сплавов*

Главной проблемой создания жаропрочного материала является требование сохранения высоких прочностных свойств с повышением температуры при удовлетворительной пластичности в широком интервале температур. Достижение этих требований возможно только при создании термически стабильных структур. В качестве жаропрочных принято использовать малолегированные по  $\beta$ -стабилизаторам двухфазные  $(\alpha+\beta)$ -сплавы и псевдо- $\beta$ -сплавы титана. Термическая стабильность двухфазной структуры определяется значениями коэффициентов диффузии легирующих элементов, энергией межфазных границ раздела и шириной области гомогенности твердого раствора, на базе которого создан сплав. Чем меньше все эти параметры, тем больше термическая стабильность сплава и тем самым выше характеристики жаропрочности.

# Жаропрочность титановых сплавов

Жаропрочность повышают добавки олова, циркония и галлия. Влияние олова, циркония и алюминия на жаропрочность.



Температурная зависимость прочности бинарных титановых сплавов по сравнению с прочностью титана технической чистоты

# *Жаропрочность титановых сплавов*

Видно, что повышение прочности при комнатной температуре больше всего у сплава, легированного оловом. Кроме того, олово увеличивает прокаливаемость сплавов, может входить в состав интерметаллидных фаз и способствует повышению вязкости. С повышением температуры испытаний выше 400 °С наиболее высокая прочность наблюдается у сплавов с повышенным содержанием алюминия, что обусловлено образованием сверхструктурной фазы  $Ti_3Al$  ( $\alpha_2$ -фазы).

Эта фаза вызывает охрупчивание сплавов при низких температурах и поэтому необходимо правильно назначать режимы обработки сплава, которые обеспечивали бы либо ее отсутствие, либо соответствующее распределение частиц, не оказывающее катастрофического влияния на пластические характеристики. Цирконий в сплавы вводят в основном для повышения жаропрочности твердого раствора, и хотя он не является существенным упрочнителем матрицы, но увеличивает прокаливаемость и модифицирует структуру. Добавка циркония в меньшей степени повышает жаропрочность, чем соответствующая добавка алюминия.

Еще более перспективным является многокомпонентное легирование.

# **Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов**

Обработка резанием титановых сплавов в основном аналогична обработке нержавеющей стали. Принято считать, что трудоемкость механической обработки сплавов титана в 2-2,5 раза больше, чем обычных углеродистых сталей. Общие режимы резания определяются свойствами титана. При обработке титана наблюдается значительно меньше площадь контакта между стружкой и инструментом, чем при обработке сталей. В результате контактное давление увеличивается и теплота трения скольжения стружки по резцу концентрируется на меньшей площади. Поскольку титан имеет очень низкую теплопроводность, это приводит к чрезвычайно высоким температурам инструмента, особенно в области контакта со стружкой. Если при резании стали в контактной области температура достигает 300–350 °С, то при резании титановых сплавов в тех же условиях температура превышает 1100–1200 °С. С повышением скорости резания температура в контактной области может повыситься еще выше. Это приводит к перегреву стружки, ее сильному окислению, иногда воспламенению. Поэтому для титана используют относительно невысокие скорости резания от 5 до 80 м/мин.

# **Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов**

Наличие на поверхности сплава твердого газонасыщенного слоя еще более затрудняет процесс резания и приводит к быстрому изнашиванию контактной поверхности резцов. Поэтому при резании титана необходимо вершину резца располагать на глубине, превышающей толщину газонасыщенного слоя или, по крайней мере, избегать попадания ее в зону повышенной твердости. В связи с этим и для избегания налипания стружки на резец при резании титана используют большую глубину резания до 8–12 мм.

С целью уменьшения износа поверхности резца, предотвращения налипания и приварки к нему титана при резании следует принимать активные меры для снижения температуры на рабочей кромке резца. Радикальным средством является небольшое повышение температуры металла до 300–400 °С. При этом у большинства титановых сплавов сопротивление сдвигу снижается почти в 2 раза при незначительном окислении, вязкость становится несколько ниже, чем при комнатной температуре, и сопротивление резанию резко уменьшается, что позволяет повысить скорость резания в несколько раз. Нагрев поверхности металла на глубину, необходимую для резания, осуществляется от индуктора, перемещающегося впереди резца.

# **Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов**

Резание рекомендуется производить инструментом с твердосплавными пластинками из сплавов типа ВК3, ВК4, ВК8. Из-за химической активности титановых сплавов для их обработки не используют титаносодержащие твердые сплавы марок Т5К10, Т15К6 и т. д. Известно, что непрерывное чистовое точение лучше вести сплавом ВК3, у которого на этих операциях стойкость в два раза выше, чем у ВК8.

Геометрические параметры резцов с пластинками из твердого сплава ВК8, рекомендованные для черновой обработки по корке: передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , задний угол  $\alpha = 12^\circ$ , главный угол в плане  $\phi = 45^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $\phi_1 = 14^\circ$ . Режимы: скорость резания  $V = 25\text{--}35$  м/мин, подача  $S = 0,5\text{--}0,8$  мм/об, глубина резания  $t$  не менее 2 мм. Режимы резания при чистовом и получистовом точении титана марки ВТ1-0 приведены на следующем слайде.

# Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов

Режимы резания при чистовом и получистовом точении титана ВТ1-0

Подача резца, мм/об	Скорость резания, м / мин, при глубине резания, мм				
	1	3	5	8	10
0,1	105	95	91	87	84
0,2	84	75	72	68	66
0,3	74	67	63	60	58
0,5	63	56	53	51	48
0,8	53	48	46	45	42
1,0	48	45	43	40	39

При применении в качестве режущего инструмента быстрорежущей стали обычно применяют резцы со следующими геометрическими параметрами рабочей части: задний угол  $\alpha = 10^\circ$ , главный угол в плане  $\phi = 45^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $\phi_1 = 15^\circ$ , радиус при вершине  $r = 1$  мм, скорость резания при точении сплава ВТ1-0  $V = 25-30$  м/мин, подача  $S$  менее 0,2 мм, глубина резания  $t = 0,5-3$  мм.

# **Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов**

При токарной обработке станки необходимо жестко закреплять и устранять вибрацию. Инструмент должен находиться как можно ближе к режущей кромке, следует избегать большого вылета его из-за высоких давлений. Преимущественно применяются малые скорости резания с большой подачей так же, как при фрезеровании, сверлении, развертывании, протягивании.

*Фрезерование – более трудная операция, чем точение при токарной обработке.* Следует учитывать, что инструмент фрезерует в продолжении только части каждого оборота, а в течение остальной части оборота стружка остается приваренной к зубу фрезы. При последующем обороте стружка сбивается вместе с куском зуба. Как и при точении рекомендуется съем толстой стружки и низкие скорости резания. Фаска на фрезе помогает рассеивать тепло.

Улучшение теплоотвода и применение попутного фрезерования способствует максимальному захвату металла в начале реза и минимальному налипанию титана на режущие лезвия. Для фрез применяют твердые сплавы ВК6М, ВК8 и режимы резания при фрезеровании ВТ1-0: глубина резания  $t = 2-4$  мм, подача  $S = 0,08-0,12$  мм/зуб, скорость резания  $v = 80-100$  м/мин – фрезами с пластинами ВК6М.

# **Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов**

При сверлении титановых сплавов важно все время поддерживать принудительную подачу и не позволять инструменту скользить по детали. Выступающая часть сверла должна быть как можно короче. В качестве материала для сверл применяют быстрорежущие стали P9K5, P9K10, P18Ф2, P9Ф5, для сверл с диаметром свыше 5 мм хорошо использовать сплав BK8. Геометрические параметры сверл:  $\phi_1 = 0-3^\circ$ ;  $\alpha = 12-15^\circ$ ,  $2\phi = 120-130^\circ$ ;  $2\phi_0 = 70-80^\circ$ ; угол наклона спиральной канавки  $25-30^\circ$ . Скорость сверления невысокая (6–10 м / мин), большая подача – 0,15–0,3 мм/об.

*Нарезание внутренней резьбы – одна из наиболее трудных операций при работе с титаном. Трудности наблюдаются при охлаждении детали, смазке зубьев метчика и при удалении стружки. Металл прилипает к зубьям, образуется нарост на режущей кромке и резьба задирается. В результате метчик сильно изнашивается или ломается. Оптимальная длина нарезки составляет 1,5 диаметра метчика. Метчики, как и сверла, рекомендуется изготавливать из быстрорежущей стали ЭИ706 (P9Ф5), стойкость которой в 2–3 раза выше, чем у стали P18.*

# **Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов**

*Нарезание наружной резьбы* должно производиться точением, накаткой или винторезной гребенкой на токарном станке, так как при использовании винторезной плашки обрабатываемая деталь к ней приваривается. Скорость нарезания наружной резьбы резцами с твердым сплавом ВК8 при скорости  $v = 25-30$  м/мин. Развертывание удовлетворительно выполняется твердосплавным инструментом, имеющим четыре канавки. Рекомендуют скорость развертки 40–70 об/мин и подачу 0,2–0,5 мм/об с применением охлаждающих масел с добавками серы.

*Протягивание* является, вероятно, наиболее трудной операцией обработки резанием. Для протяжного инструмента рекомендуется кобальтовая быстрорежущая сталь. Для получения наилучших результатов материал не должен иметь твердость свыше 37 единиц HRC, так как при более высокой твердости возможно заедание и повышенное сопротивление материала протягиванию. Рекомендуется обязательная шлифовка инструмента. Абсолютно необходимо жесткое крепление инструмента; протяжка должна производиться за один проход. Хорошими смазками являются масла сульфурезированные.

# **Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов**

**Шлифование.** По характеру износа кругов шлифование титана резко отличается от шлифования стали. При шлифовке стали основной износ кругов связан с разрушением связующего абразива. При шлифовании титана износ является результатом истирания, возможно, из-за взаимодействия абразива и титана. При уменьшении скорости круга и применении соответствующего охладителя температура в контактной точке понижается и истирание уменьшается, а «коэффициент шлифования» – отношение количества снятого металла в  $\text{см}^3$  к износу круга в  $\text{см}^3$  – увеличивается.

При выборе абразивных кругов по твердости необходимо иметь в виду, что чем тверже обрабатываемый материал, тем мягче должен быть круг, так как работа с мягкими кругами более производительна, хотя и связана с повышенным их расходом. Зернистость круга выбирают в зависимости от допуска и требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности – чем ниже шероховатость, тем больше №, характеризующий зернистость. Для шлифования титана используют круги из карбида кремния, реже из электрокорунда.

# **Подбор инструмента и режимов резания при обработке титановых сплавов**

**Шлифование.** По характеру износа кругов шлифование титана резко отличается от шлифования стали. При шлифовке стали основной износ кругов связан с разрушением связующего абразива. При шлифовании титана износ является результатом истирания, возможно, из-за взаимодействия абразива и титана. При уменьшении скорости круга и применении соответствующего охладителя температура в контактной точке понижается и истирание уменьшается, а «коэффициент шлифования» – отношение количества снятого металла в  $\text{см}^3$  к износу круга в  $\text{см}^3$  – увеличивается.

При выборе абразивных кругов по твердости необходимо иметь в виду, что чем тверже обрабатываемый материал, тем мягче должен быть круг, так как работа с мягкими кругами более производительна, хотя и связана с повышенным их расходом. Зернистость круга выбирают в зависимости от допуска и требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности – чем ниже шероховатость, тем больше №, характеризующий зернистость. Для шлифования титана используют круги из карбида кремния, реже из электрокорунда.