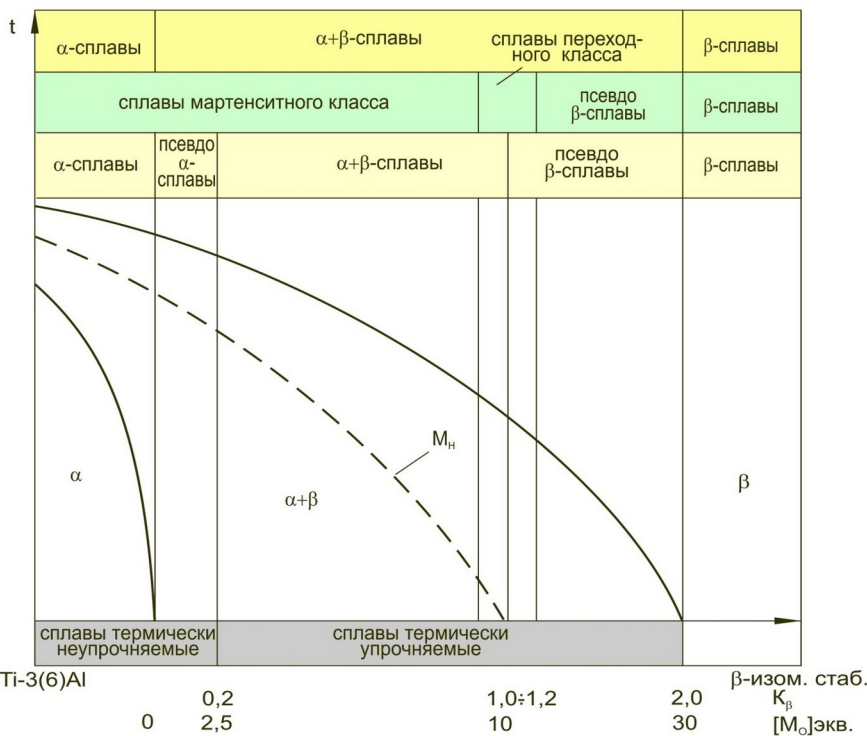


№	Сплав	[Mo] _{экв}	K _β	Отжиг	Закалка	Проч.	Терм.	≤9%
1	Ti-6Al-6V-2Sn	4,26	0,36	α+β	март.	выс.	упр.	6
	Ti-3Al	0	0	α	март.	сред.	не упр.	3
	Ti-5Al-4Mo-4Zr-2Sn-2Cr-1Fe	9,34	0,88	α+β	март.	выс.	упр.	6,7
	Ti-5Al-0,3Si-0,5Cr-0,5Fe	1,84	0,17	псевдо-α	март.	выс.	не упр.	5
2	Ti-3Al-8V-4Mo-6Cr-4Zr	19,7	1,78	α+β	псевдо-β	сред.	упр.	3
	Ti-2Al-2,5Zr	0	0	α	март.	сред.	не упр.	2,5
	Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si	0,5	0,05	псевдо-α	март.	выс.	не упр.	6,9
	Ti-5Al-1,5Fe	3,0	0,27	α+β	март.	выс.	упр.	5
3	Ti-6Al-1Sn-1Zr-4Mo-0,2Si	4,0	0,4	α+β	март.	выс.	упр.	6,5
	Ti-2Al-11V-2Sn-11Zr	7,81	0,66	α+β	март.	сред.	упр.	4,5
	Ti-4Al-0,005B	0	0	α	март.	сред.	не упр.	4
	Ti-5Al-1Sn-1Zr-1V-1Mo	1,71	0,16	псевдо-α	март.	выс.	не упр.	5,5



$$[Mo]_{\text{экв}} = Mo + 0,71 \cdot V + 1,67 \cdot Cr + 2 \cdot Fe$$

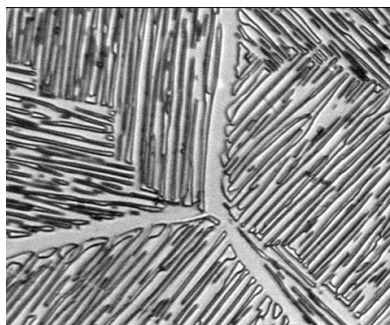
$$K_{\beta} = 0,1 \cdot Mo + 0,06 \cdot V + 0,15 \cdot Cr + 0,18 \cdot Fe$$

$$[Al]_{\text{экв}} = Al + 0,33 \cdot Sn + 0,17 \cdot Zr$$

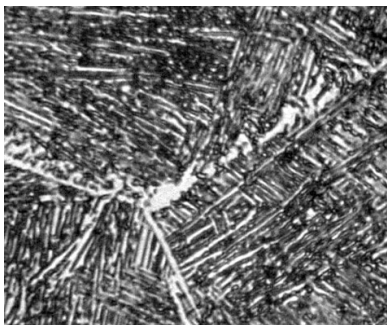
Класс сплавов	[Mo] _{экв}	[Al] _{экв}	K _β
α-сплавы	0	0,8 - 7	0
Псевдо-α-сплавы	≤ 2,75	2 - 9	≤ 0,25
(α+β)-сплавы	3,3 - 10	4 - 8,5	0,3 - 0,9
Псевдо β-сплавы	15,5 - 26,5	4 - 5	1,4 - 2,4
β-сплавы	≥ 27,5	≥ 1	≥ 2,5

БИЛЕТ №4

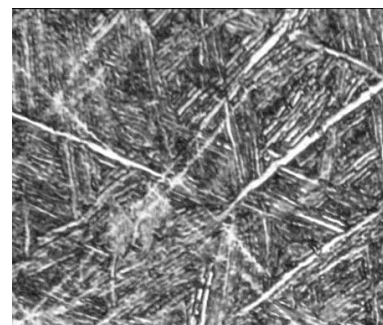
На рисунке показана микроструктура псевдо- α титанового сплава ($A_{c3}=1050^{\circ}\text{C}$) после изотермической обработки по следующим режимам:



а) нагрев до 1070°C , выдержка 30 минут, быстрое охлаждение ($v > v_{кр}^I$) до 1000°C , выдержка 60 минут;



б) нагрев до 1070°C , выдержка 30 минут, быстрое охлаждение ($v > v_{кр}^I$) до 900°C , выдержка 60 минут;



в) нагрев до 1070°C , выдержка 30 минут, быстрое охлаждение ($v > v_{кр}^I$) до 700°C , выдержка 60 минут.

Ответ: Предварительный нагрев был произведен в β -области, выше T_{III} , изотермическая выдержка произведена в $(\alpha+\beta)$ -области. Вблизи T_{III} основную роль играют высокоугловые границы β -фазы (а), т.е. они являются предпочтительными местами зарождения α -фазы (она в первую очередь образуется по границам зерен, четко видна). Имеет толщину больше, чем пластины, которые расположены в теле зерна, которые образуются дальше в процессе изотермической выдержки.

С понижением температуры (б) роль высокоугловой границы исходного β -зерна снижается, и предпочтительными местами зарождения будут являться дислокации, расположенные в теле зерна. На микроструктуре (б) видно, что α -оторочка уже тонкая и соизмерима с толщиной пластин α -фазы в теле зерна, т.е. температура была ниже, чем на (а).

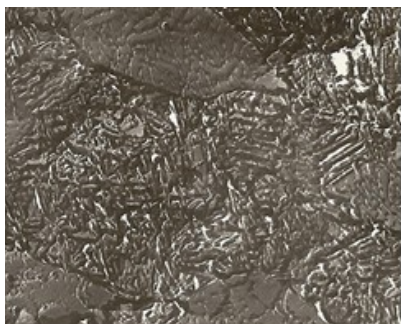
На микроструктуре (в) α -оторочка не выделяется, а идет распад одновременно по телу зерна, следовательно, температура наинизшая.

БИЛЕТ №5

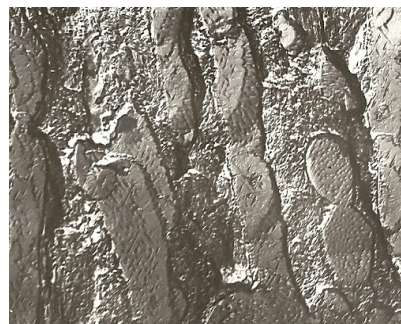
На рисунке показана микроструктура $\alpha+\beta$ - титанового сплава ($A_{c3}=960^{\circ}\text{C}$) после упрочняющей термической обработки по следующим режимам:



а) нагрев до 1000°C , выдержка 30 минут, охлаждение со скоростью ($v > v_{кр}^I$) до нормальной температуры, старение при 600°C , выдержка 100 секунд;



б) нагрев до 1000°C , выдержка 30 минут, охлаждение со скоростью ($v > v_{кр}^I$) до нормальной температуры, старение при 550°C , выдержка 400 секунд;



в) нагрев до 1000°C , выдержка 30 минут, охлаждение со скоростью ($v > v_{кр}^I$) до нормальной температуры, старение при 450°C , выдержка 1000 секунд.

Ответ: Упрочняющая ТО – это закалка+старение. Закалка производилась из β -области, т.к. $T_{\text{наг}}$ выше $T_{\text{пп}}$.

Чем ниже температура старения, тем более дисперсными будут выделяться частицы α -фазы (в).

Чем больше время выдержки, тем интенсивнее в процессе выдержки будет происходить коалесценция α -фазы, т.е. увеличение одних частиц за счет других (в).

Чем мельче размер структурных составляющих, тем меньше температура, при которой они образовались.

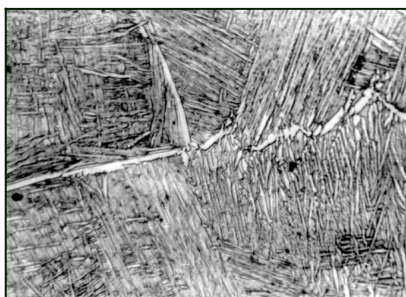
На приведенных микроструктурах видно, как с понижением температуры ($a > б > в$) старения размер частиц α -фазы становится меньше.

БИЛЕТ №6

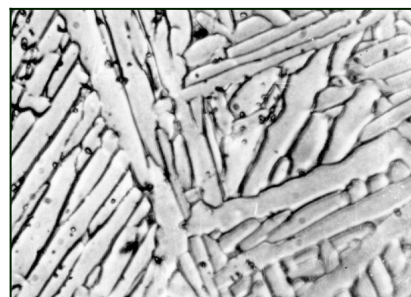
На рисунке показана микроструктура $\alpha+\beta$ - титанового сплава после охлаждения из β -области до нормальной температуры со скоростью:



а) $v_{\text{охл}} = 70 \text{ K/c}$;



б) $v_{\text{охл}} = 0,4 \text{ K/c}$;



в) $v_{\text{охл}} = 0,03 \text{ K/c}$

Ответ: $\uparrow v_{\text{охл}} \downarrow$ пластины

С понижением скорости охлаждения ($v_{\text{охл}}$) будет более равновесная структура, т.е. больше будут успевать происходить диффузионные процессы и будут крупнее структурные составляющие.

С понижением $v_{\text{охл}}$ количество образующихся в процессе охлаждения α -фазы увеличивается.

Чем меньше $v_{\text{охл}}$, тем больше распад, и частицы α -фазы успевают еще подрасти; четко видны границы α -фазы.

БИЛЕТ №7

На рисунке показана микроструктура $\alpha+\beta$ - титанового сплава после охлаждения из $\alpha+\beta$ -области до нормальной температуры со скоростью:



а) $v_{\text{охл}} = 70 \text{ K/c}$;



б) $v_{\text{охл}} = 5 \text{ K/c}$;



в) $v_{\text{охл}} = 0,4 \text{ K/c}$.

Ответ: С понижением скорости охлаждения ($v_{охл}$) будет более равновесная структура, т.е. больше будут успевать происходить диффузионные процессы и будут крупнее структурные составляющие (в).

С понижением $v_{охл}$ количество образующихся в процессе охлаждения α -фазы увеличивается.

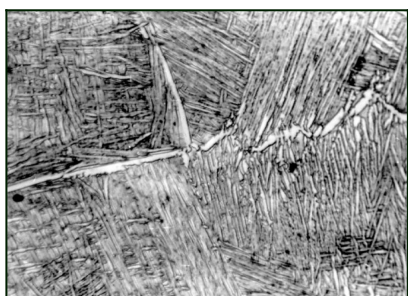
Но чем меньше $v_{охл}$, тем больше распад, и частицы α -фазы успевают еще подрасти; четко видны границы α -фазы.

Присутствуют первичные частицы α -фазы, с которыми ничего не происходит (широкие пластины).

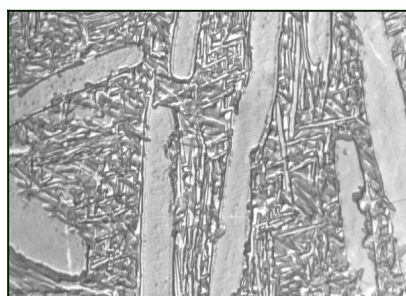
По размеру образующейся α -фазы в β можно судить о скорости охлаждения: чем ниже $v_{охл}$, тем больше размер (в) образующейся в процессе охлаждения α -фазы.

БИЛЕТ №8

На рисунке показана микроструктура $\alpha+\beta$ - титанового сплава после охлаждения из β - и $\alpha+\beta$ -области до нормальной температуры со скоростью $0,4K/c$:



охлаждение из β -области

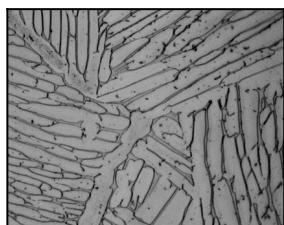


охлаждение из $\alpha+\beta$ -области

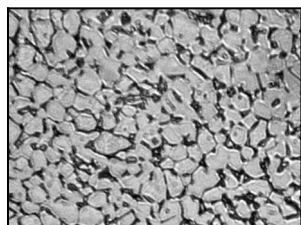
Ответ: Охлаждение из β -области всегда характеризуется α -оторочкой, образовавшейся при переходе через $T_{\text{пт}}$, которая видна на микроструктуре (слева). Микроструктуре после охлаждения из $\alpha+\beta$ -области свойственны большие пластины первичной α -фазы, между которыми расположены частицы α -фазы; неоднородная структура.

БИЛЕТ №9-12

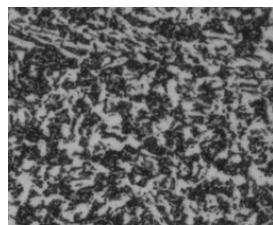
На рисунке показана микроструктура $\alpha+\beta$ титанового сплава, полученная после различных режимов обработки.



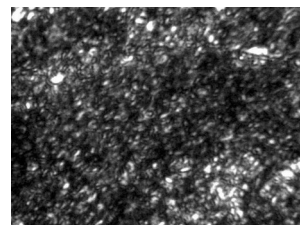
а) пластинчатая



б) глобулярная



в) бимодальная



г) дисперсная

Ответ:

а) Пластинчатая структура представлена β -зернами, окруженными α -оторочкой и внутризеренной грубопластинчатой α -фазой.

б) В глобулярных структурах частицы первичной α -фазы не полностью сфероидизированы, в бимодальных структурах первичная α -фаза полностью глобуляризована, между частицами первичной α -фазы расположено пластинчатое выделение α -фазы.

Глобулярная структура характеризуется зернами первичной α -фазы, ограниченными по границам β -фазой в виде тонких прослоек.

в) Бимодальная структура состоит из пластинчатой и глобулярной составляющих.

Бимодальная структура сочетает в себе зерна первичной α -фазы (светлые области) и β -зерна с пластинами (темная область).

г) Дисперсная структура характеризуется мелкими размерами α -фазы

Билет №9 Как получить структуру с пластинчатой морфологией α -фазы?

Пластинчатая структура α -фазы формируется при малых скоростях охлаждения из β -области внутри бывших β -зерен, т.е. в структуре присутствует бывшее β -зерно, в котором расположены α -колонии.

Билет № 10 Как получить структуру с глобулярной морфологией α -фазы?

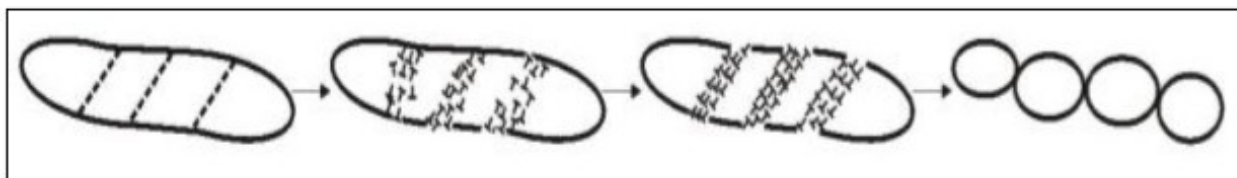
В основе образования глобулярной структуры лежат процессы деления пластин α -фазы, в основе которого лежит фазовое превращение.

Глобулярную структуру можно получить только с помощью термомеханической обработки: пластической деформации, в процессе которой идет накопление дефектов кристаллического строения, т.е. как и в β -матрице, так и в α -пластинах накапливаются дислокации. Если в пластинах нет дислокаций повышенных концентраций, то деления пластин происходить НЕ БУДЕТ!

Затем либо в процессе деформации, либо в процессе последующего отжига после деформации будет происходить глобуляризация пластин α -фазы.

При определенных условиях деформация пластинчатой α -фазы сопровождается глобуляризацией – процессом деления пластин на зерна глобулярного типа. Движущей силой этого процесса считают изменение поверхностной энергии в месте выхода на межфазную поверхность внутренней границы.

Процесс глобуляризации приводит в итоге к формированию зеренной структуры.



Схематическое представление глобуляризации пластинчатой фазы

Билет № 11 Как получить структуру с бимодальной морфологией α -фазы?

Получение требуемого фазового состава и структуры зависит от температурно-деформационных параметров применяемой технологии изготовления заготовок и режимов их последующей ТО.

Бимодальная структура получается при нагреве в $(\alpha+\beta)$ -область и последующем медленном охлаждении; в этой структуре небольшая объемная доля первичной α -фазы глобулярной формы, распределена в мелкозернистой пластинчатой матрице вторичной α -фазы.

Регулируя параметры бимодальной структуры, в частности долю первичной α -фазы в β -превращенной пластинчатой матрице, можно получить широкий комплекс свойств от уровня, характерного для глобулярной структуры, до уровня, свойственной пластинчатой структуре.

Такая структура создается при высокотемпературной деформации в $\alpha+\beta$ -области в условиях тормозящего влияния α -фазы на зарождение и рост зерен β -фазы. При этом для обеспечения оптимального комплекса свойств необходимо регламентировать не только долю первичной α -фазы, но и размеры исходных β -зерен, толщину пластин вторичной α -фазы и размеры первичной α -фазы.

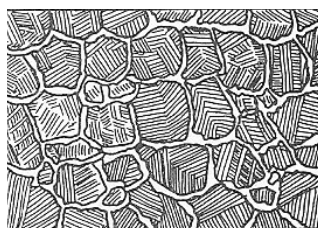
Билет № 12 Как получить структуру с дисперсной морфологией α -фазы?

Максимальная степень **дисперсной структуры** достигается при скорости охлаждения $v_{кр}^3$ ($v_{кр}^2 < v_{кр}^3 < v_{кр}^1$), т.е. когда диффузия достаточно быстро идет, но при этом еще образуются зародыши α -фазы, но расти они не успевают. Чем ниже температура старения, тем более дисперсной будет α -фаза. Чем ниже время выдержки, тем меньше будет размер структурных составляющих.

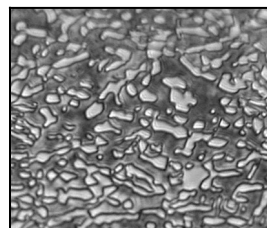
Упрочняющая термическая обработка для $\alpha+\beta$ -сплавов состоит из закалки и старения. Закалка заключается в нагреве до температур, несколько ниже полного превращения $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ (в β -состоянии происходит интенсивный рост зерна), выдержке и последующем быстром охлаждении. При искусственном старении происходит распад закалочных структур (α' , α'' , β'). Конечные продукты — дисперсные α и β -фазы, близкие к равновесному состоянию, образование которых вызывает дисперсионное упрочнение (твердение) сплава.

БИЛЕТ №13

На рисунке показана микроструктура $\alpha+\beta$ - титанового сплава, полученная после деформации в β - и $\alpha+\beta$ -области и охлаждения до нормальной температуры



в β -области



в $\alpha+\beta$ -области

1) α -оторочка и пластинчатая структура — подтверждение того, что деформация производилась в β -области. Данная структура применяется редко. Для двухфазных сплавов должна быть не видимой α -оторочка и пластины должны иметь более округлую форму.

На рисунке слева представлена **внутризеренная структура** в результате полиморфного превращения в процессе охлаждения.

При формировании при охлаждении **внутризеренной структуры** выделяющаяся α -фаза располагается прежде всего в виде сплошной прослойки по границам β -зерен, очерчивая их форму и тем самым, устраняя возможность их изменения. Затем α -фаза появляется во внутризеренных объемах в форме **пластин**, собранных в колонии (пачки), в пределах которых α -пластины параллельны между собой и имеют одинаковую кристаллографическую ориентировку. α -пластины разделены прослойками остаточной β -фазы.

2) глобулярная структура – подтверждение того, что деформация производилась в $\alpha+\beta$ -области

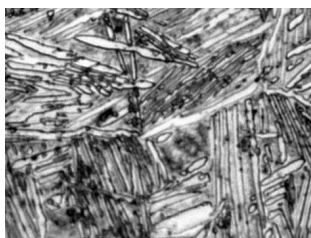
Вдоль направления прокатки (вдоль направления действующей силы) будут не только β -зерна вытягиваться, но и α -фаза будет менять свою ориентировку, она тоже будет выстраиваться вдоль направления прокатки. Далее происходит деление пластин и образование глобул – и это **не рекристаллизация** (структурное превращение, при этом фазовый состав не меняется). В основе образования глобулярной структуры лежат процессы деления пластин α -фазы, в основе которого лежит фазовое превращение.

Глобулярную структуру можно получить только с помощью термомеханической обработки: пластической деформации, в процессе которой идет накопление дефектов кристаллического строения, т.е. как и в β -матрице, так и в α -пластинах накапливаются дислокации. Если в пластинах нет дислокаций повышенных концентраций, то деления пластин происходить НЕ БУДЕТ!

Затем либо в процессе деформации, либо в процессе последующего отжига после деформации будет происходить глобуляризация пластин α -фазы.

БИЛЕТ №14

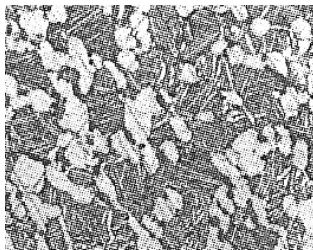
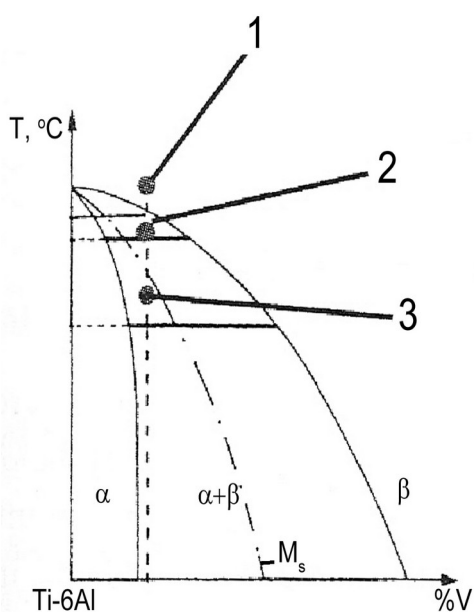
Определить какая структура соответствует нагреву до температуры **1** с последующим охлаждением со скоростью меньше второй критической до нормальной температуры



Когда нагрев происходит до β -области, то структура портится. Охлаждение из β -области характеризуется большими β -зернами, α -оторочкой и пластинами внутри β -зерна.

БИЛЕТ №15

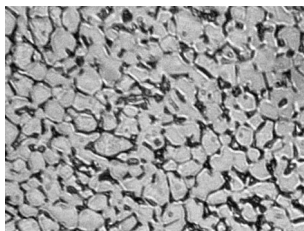
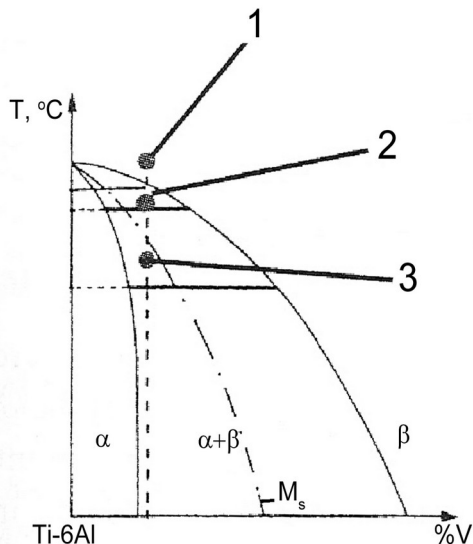
Определить какая структура соответствует нагреву до температуры **2** с последующим охлаждением со скоростью меньше второй критической до нормальной температуры



Чем крупнее частицы α -фазы, тем ближе температура нагрева была ближе к A_{c3} и количество их было меньше, и больше вторичная α -фаза, которая выделяется в процессе охлаждения.

БИЛЕТ №16

Определить какая структура соответствует нагреву до температуры **3** с последующим охлаждением со скоростью меньше второй критической до нормальной температуры

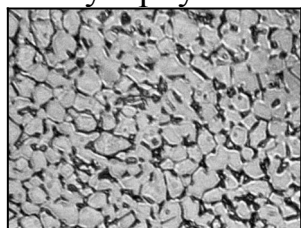


Чем ниже температура нагрева, тем меньше изменения в структуре. Это требуется, когда изначальная структура была хорошей, и сильно нагревать сплав не надо, чтобы структура не менялась. То есть надо проводить неполный отжиг для уменьшения остаточных напряжений.

БИЛЕТ №17

Какую структуру нужно создать в титановом сплаве, если известно, что изготовленная из этого сплава деталь будет испытывать знакопеременные нагрузки в процессе эксплуатации при нормальной температуре (т.е. должна иметь высокий предел выносливости σ_{-1}).

Глобулярную



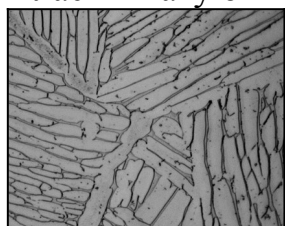
Глобулярная структура является мелкодисперсной.

Сопротивление циклическим нагрузкам зависит от скоростей зарождения и распространения усталостных трещин, которые, в свою очередь, чувствительны к структурному состоянию материала и стабильности этого состояния под нагрузкой. Важнейшими структурными параметрами поликристаллических материалов является размер зерна. При **уменьшении размера зерна** уменьшается концентрация напряжений на границе, что приводит к **повышению предела выносливости**. В крупнозернистом материале барьерная роль границ зерна уменьшается, и уже при меньших напряжениях полоса скольжения переходит из одного зерна в другое, т.е. распространяется усталостная повреждаемость.

БИЛЕТ №18

Какую структуру нужно создать в титановом сплаве, если известно, что изготовленная из этого сплава деталь должна иметь высокие характеристики жаропрочности (длительную прочность, ползучесть) при температуре 550°C.

Пластинчатую



Более крупное зерно способствует повышению жаропрочности. В сплавах с пластинчатой структурой сопротивление ползучести возрастает с увеличением размера β -зерна, α -колоний и толщины пластин первичной α -фазы, а длительная прочность максимальна при некотором определенном размере зерна.

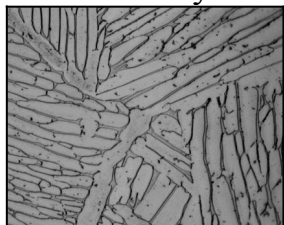
По длительной прочности и сопротивлению ползучести превосходство пластинчатой структуры перед глобулярной тем больше, чем выше температура и больше продолжительность испытаний. Но если деталь будет при этом еще испытывать

знакопеременные нагрузки, потребуется бимодальная структура.

БИЛЕТ №19

Какую структуру нужно создать в титановом сплаве, если известно, что изготовленная из этого сплава деталь должна иметь высокое сопротивление распространению усталостной трещины (вязкость разрушения K_{Ic}) при нормальной температуре.

Пластинчатую



Чем дисперсней структура, тем ниже K_{Ic} , так как если трещина зарождается, то она быстро «проскочит» все глобулы и деталь разрушится. Если трещина распространяется вдоль пластин, она их быстро «пробежит», но потом она упрутся в α -оторочку и будет долго ее преодолевать, так как нужно накопить много энергии. После прохождения α -оторочки трещина либо будет накапливать энергию, чтобы «перерезать» пластины, расположенные поперек, либо начнет разветвляться и идти вдоль пластин. Но это все занимает много энергии и времени, поэтому скорость распространения трещины будет медленная, по сравнению с глобулярной.