



The metallographic investigations of titanium alloy Ti-6Al-4V ELI after deformation with yield degree in the range 0,152-0,56 at temperature within the range of 900-1050 °C are carried out. It is determined that the more is the difference between the temperature of deforming and temperature of phase conversion of alloy, the higher is non-uniformity of deformation in height of slug.

В. Г. КАНТИН, И. К. ДАНИЛЬЧИК, Г. П. ГОРЕЦКИЙ, В. Л. КРАСИКОВ,
ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

УДК 621.74

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА Ti-6Al-4V ELI

Введение. Титановые сплавы находят широкое применение при изготовлении деталей медицинских имплантатов благодаря уникальному сочетанию превосходной коррозионной стойкости, высокой прочности, низкой удельной массы и модуля упругости [1–3]. Причем для ответственных высоконагруженных деталей (например, ножки эндопротеза тазобедренного сустава) наиболее часто применяется сплав VT-6 и его модификации, одной из которых является сплав Ti-6Al-4V ELI, характеризующийся более высокими требованиями к химическому составу (процентному содержанию легирующих элементов) для гарантирования стабильности свойств. Вместе с тем получение стабильных свойств по сечению изделия после термомеханической обработки обуславливает поиск оптимальных режимов деформации сплава (температуры и степени деформации).

Горячая деформация титанового сплава сопровождается одновременно протекающими конкурирующими процессами упрочнения и разупрочнения. В процессе нагрева сплава под деформацию до температур выше температур рекристаллизации происходит рост зерна и тем больший, чем выше температура и больше длительность нагрева. Деформация способствует измельчению зерен, причем наиболее интенсивно в области выше критических степеней до средних степеней деформации 40–50%. При этом с ростом температуры деформации измельчение зерен происходит более сильно. Медленное охлаждение после деформации (охлаждение на спокойном воздухе) приводит к обратному процессу — рекристаллизации, т.е. процессу зарождения и роста равноосных зерен, свободных от напряжений. Считается установленным, что чем выше упрочнение в результате деформации, т.е. чем выше степень деформации, тем ниже температура и скорость начала рекристаллизации. С уменьшением степени деформации уменьшается и количество зародышей, что при-

водит к образованию больших по размеру рекристаллизованных зерен.

Методики проведения исследований. Исходя из общепринятых представлений о влиянии термомеханических режимов деформации на структуру титановых сплавов, а, следовательно, и его свойства, изучение структурных особенностей сплава Ti-6Al-4V ELI осуществляли на цилиндрических образцах, подвергнутых осадке перпендикулярно образующей, что соответствует реальным условиям получения поковок ножек эндопротезов тазобедренного сустава. Влияние температуры нагрева на структуру сплава изучали на образцах, осажённых на различную величину при температурах 900, 980 и 1050 °C. Для сравнения и определения влияния степени осадки микроструктуру исследовали на образцах, осажённых со средними степенями осадки 0,152 и 0,56. Вследствие неоднородности деформации в плоскости шлифа экспонирование структур производили на большом фотомикроскопе NEOPHOT-21 цифровым фотоаппаратом SONY DSC-W7 в трех плоскостях — средней (плоскости симметрии), а также параллельных ей и удаленных от нее на 2 и 4 мм, в точках вблизи свободной изогнутой поверхности шлифа.

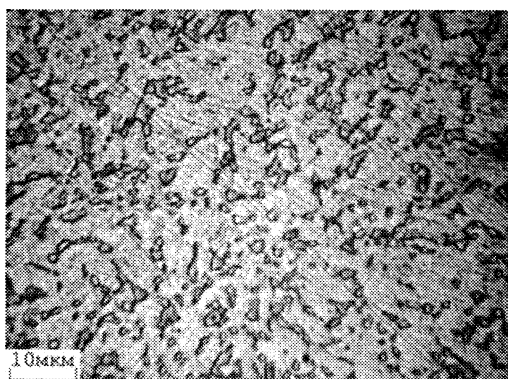
Контроль твердости по Роквеллу производили на приборе ТК-2М по шкале С с нагрузкой 150 кгс на предварительно зачищенных от оксидных пленок и альфированного слоя образцах, осажённых при температурах 900, 980 и 1050 °C со степенями осадки 0,152, 0,288, 0,42 и 0,56.

Обсуждение результатов. Анализ микроструктур показывает, что при осадке образцов со средней степенью 0,56 и температуре 900 °C (см. рисунок, б) основу сплава по структуре составляет α-фаза с небольшим количеством (10–20%) β-фазы. В местах с большей локальной деформацией размер включений β-фазы и ее количество несколько больше, чем в местах с меньшей локальной деформацией. Возможной причиной

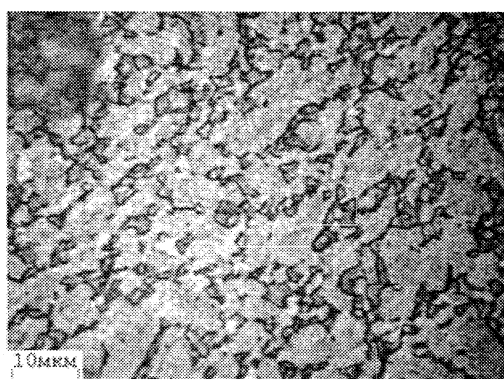
этому является тепловой эффект деформации, проявляющийся более сильно в местах наибольших сдвиговых деформаций. В результате дополнительного тепловыделения температура в местах максимальных деформаций может приближаться и даже превышать температуру полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения сплава (972–975 °С), что способствует увеличению количества β -фазы в структуре сплава.

С повышением температуры деформации до 980 °С, несколько большей температуры начала $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, количество β -фазы в структуре сплава еще больше возрастает и достигает примерно соотношения с α -фазой 50:50% (см.

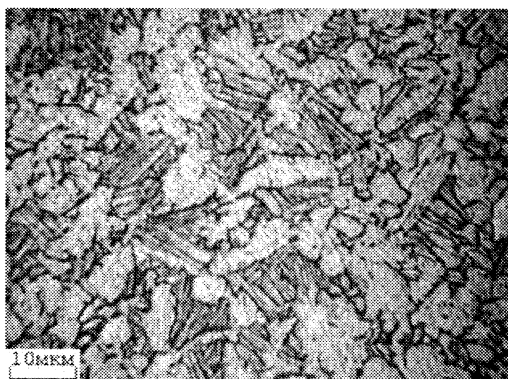
рисунок, з). При этом закономерность влияния дополнительного тепловыделения в локальных объемах образца сохраняется, как и при температуре деформации 900 °С, но в меньшей мере. Характерной особенностью структуры, полученной при этой температуре деформации, является игольчатое строение типа корзиночного плетения. Образование пластинчатой игольчатой структуры связано с быстрым охлаждением и обратным переходом $\beta \rightarrow \alpha$ по типу мартенситного превращения. Получаемая при этом текстура зерен α -фазы внутри бывших зерен β -фазы проявляется в наибольшей мере с увеличением локальной деформации.



a



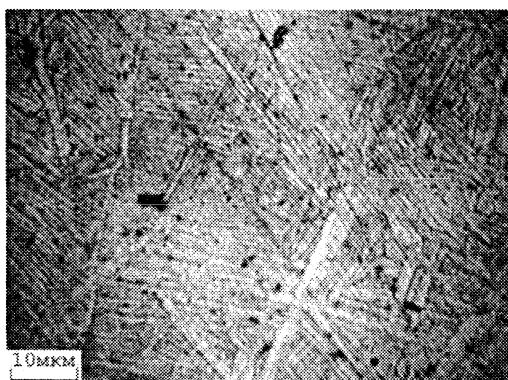
б



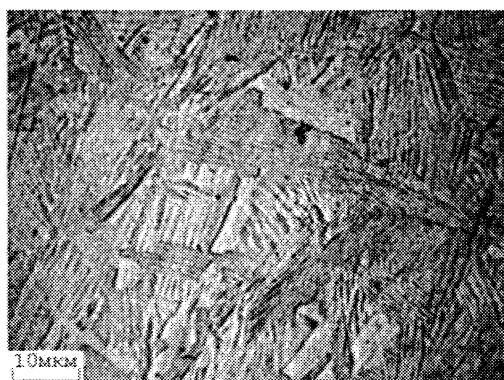
в



г



д



е

Структура сплава Ti-6Al-4V ELI после деформации с $\delta=0,152$ (*a, в, д*) и $\delta=0,56$ (*б, г, е*) при температуре $T=900$ °С (*a, б*), $T=980$ °С (*в, г*) и $T=1050$ °С (*д, е*) в местах наибольшей локальной деформации. $\times 1000$

При деформировании с температуры 1050 °С, т.е. температуры выше температуры полиморфного превращения, образуется однофазная (β -фаза) структура, характеризующаяся резко очерченными границами и грубоигольчатым строением внутри зерна. Такой структуре свойственны пониженные показатели пластичности и выносливости. Исправление такой структуры термической обработкой невозможно и достигается лишь повторной деформацией в ($\alpha+\beta$)-области. Существенной разницы, связанной с различными локальными деформациями в сечении шлифа, при деформации с температуры 1050 °С и средней степени осадки 50% в структуре сплава не обнаружено (см. рисунок, е).

Деформирование со степенями осадки 12–15% характеризуется возможным аномальным ростом зерна. Однако при температуре нагрева под осадку $T=900$ °С (см. рисунок, а) роста зерна не наблюдается. Основу структуры составляет α -фаза с мелкими выделениями β -фазы, которые по размеру меньше, чем при деформации со средней степенью 50%. В силу небольшой по величине средней степени осадки различий в структуре в разных точках плоскости шлифа не наблюдается.

При повышении температуры деформирования до 980 °С (см. рисунок, в) фазовый состав сплава сохраняется ($\alpha+\beta$), но количество β -фазы резко возрастает. Соотношение фаз приблизительно такое же, как и при деформации со средней степенью 50% при той же температуре 980 °С. Однако уже при температуре 980 °С, т.е. температуре немного превышающей температуру полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, начинается существенный рост зерна. Особенно заметно различие в размерах при сравнении со структурами, полученными при средней деформации 50%. В пределах плоскости шлифа даже при общей небольшой

деформации (15%) соблюдается та же зависимость – с увеличением степени локальной деформации размер зерна уменьшается. Поскольку деформация начинается при температуре выше точки превращения, а заканчивается в двухфазной области, то характерной особенностью структуры является игольчатое строение корзиночного типа. В этих структурах β -фаза, существующая при температурах деформирования, ниже точки полиморфного превращения при быстром охлаждении переходит в α' -структуру игольчатого строения.

С увеличением температуры деформации до 1050 °С образуется однофазная структура – β -титан. При деформировании с этих температур (область β -фазы) отмечается значительный рост зерна. Площадь микрзерна при повышении температуры деформации от 980 до 1050 °С возрастает в среднем с площади 250–300 до 2000–2500 мкм². Структура характеризуется грубоигольчатым строением внутри зерна, размер которого практически не отличается при изменении локальных деформаций в плоскости шлифа (см. рисунок, д).

Структурные изменения, происходящие при температурном и механическом воздействии на испытываемый материал, а также анизотропия пластической деформации при поперечной осадке («сплющивании») образцов, оказывают влияние, в конечном счете, на уровень механико-технологических свойств материала. Возникающее при этом упрочнение, как следствие пластической деформации и структурной перестройки титанового сплава, может быть выявлено испытанием твердости, хорошо коррелирующей с прочностной характеристикой деформированного сплава. Результаты измерений, как среднеарифметические значения по 4–5 показаниям прибора, приведены в таблице.

Твердость осажженных образцов

Температура, °С	Средняя степень деформации			
	0,152	0,288	0,42	0,56
900	36,0	36,2	35,5	33,5
980	34,0	36,4	34,5	31,8
1050	33,6	33,0	34,3	32,0

Повышение температуры деформации титанового сплава Ti-6Al-4V ELI приводит к уменьшению твердости на 2–3 ед. НРС относительно оптимальных с точки зрения структурообразования температур деформации 900–960 °С. Эксперименты подтверждают установленную зависимость того, что деформирование в β -области снижает механические свойства сплава VT-6: относительное сужение – на 30–40%, предел текучести – на 5% [4].

Выводы

1. Термомеханические режимы деформации влияют на структуру титанового сплава Ti-6Al-4V ELI и, следовательно, на его свойства. Образцы, деформированные в области ниже температуры фазового превращения, характеризуются равноосной мелкозернистой структурой. В этой области температур деформация имеет неоднородный характер по высоте заготовки. Чем больше разница между температурой деформирования и темпера-

турой фазового превращения, тем ярче выражена неравномерность деформации. Повышение степени деформации при обработке в области температур фазового превращения обеспечивает получение однородной мелкозернистой структуры двухфазного титанового сплава.

2. С ростом температуры деформации образцов при всех степенях осадки наблюдается падение твердости на 4–5 ед. НРС. Наибольшая твердость образцов независимо от степени осадки отмечена при температуре 900 °С, структура которых после деформации характеризуется мелким и равноосным зерном α -фазы. С увеличением температуры деформации выше $\alpha \rightarrow \beta$ -перехода наблюдается снижение твердости на 1,5–2,0 ед. НРС. При этом интенсивность уменьшения твердости по мере приближения к температуре $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения снижается. Пониженная по сравнению с твердостью образцов при других степенях обжатия твердость образцов, осажённых со степенью 0,56, может быть объяснена более интенсивным ростом рекристаллизованных зерен

и пониженной температурой рекристаллизации.

3. Оптимальными технологическими режимами горячего деформирования поковок из сплава Ti-6Al-4V ELI для эндопротезов являются температура нагрева 970–980 °С и степень деформации 0,4–0,6.

Литература

1. Ивашко В.В., Красиков В.Л. Имплантанты из титана и его сплавов // Инженер-механик. 2004. № 2(23). С. 33–36.
2. Руцкий А.В., Доста А.Д., Маслов А.П. Выбор материалов для производства эндопротезов тазобедренного сустава // Современные технологии диагностики, лечения и реабилитации повреждений и заболеваний опорно-двигательной системы: Материалы VII съезда травматологов-ортопедов Республики Беларусь. Мн.: БГЭУ, 2002. С. 355–358.
3. Von Dr.-Ing GÜNTER BENSMANN, Hauptabteilungsleiter, Krupp Medizintechnik GmbH, Essen: Welcher Werkstoff ist für welche Endoprothese geeignet? Versuch einer Werkstoffeignungsbewertung am Beispiel von Hüftendoprothesen. Technische Mitteilungen Krupp, 1992. S. 45–60.
4. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1968.