

# Моделирование последовательного процесса термообработки и деформирования титанового образца при изменении структуры металла

Федотов В.П.

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

В работе рассмотрена математическая модель последовательного процесса нагрева до температуры полиморфного превращения, охлаждения с различными скоростями и последующего деформирования титановых образцов. Экспериментально этот процесс достаточно хорошо исследован и параметры процесса могут контролироваться в лабораторных условиях. Однако, подобная ситуация может возникнуть при эксплуатации титановых деталей в условиях больших перепадов температур. В таких случаях изменение механических прочностных свойств экспериментальными методами контролировать затруднительно и необходимо математическое моделирование и решение соответствующих задач.

В работе рассматривается модель конкретного процесса, поэтому сначала оговариваются его особенности, затем формулируются соответствующие этому процессу уравнения и краевые условия и приводится пример численного решения. В качестве примера численной реализации приводится сравнение результатов механической задачи для титановых образцов, находящихся под одинаковыми статическими нагрузками и при одной и той же температуре, но прошедших термообработку в различных режимах.

## Особенности технологического процесса

Титановые сплавы отличаются большим разнообразием структур, которые могут быть получены при изменении технологии деформации и режимов их термической обработки [1]. Эти отличия определяют широкий разброс механических свойств, причем влияние структуры на различные механические характеристики неодинаково. Использование титановых сплавов, как правило, в ответственных конструкциях требует отслеживания формирования структуры и учета ее при прогнозировании и изучении процессов деформирования и разрушения. Накопленный экспериментальный материал отражает лишь часть широкого спектра влияния предварительной обработки, влияющей на механические свойства материала. Как правило, при опубликовании экспериментальных данных по диаграмме нагружения указывается характер предварительной термообработки. Однако, в большинстве случаев, в механических испытаниях термообработка применяется для восстановления механических свойств металла, которые могли измениться при изготовлении опытного образца. Экспериментальных кривых нагружения, полученных для одного и того же металла в различных условиях предварительной обработки, меняющей структуру металла, пока мало.

В качестве примера рассмотрим деформацию титановых сплавов ВТ8 и ВТ9, которые охлаждались от  $1100^{\circ}\text{C}$ ... $900^{\circ}\text{C}$  на воздухе и в печи. Такая обработка, как было установлено в [2], приводит к получению трех основных типов различных двухфазных структур:

- мелкоглобулярная, формирующаяся при охлаждении от  $900^{\circ}\text{C}$  в печи и на воздухе;
- тонкопластинчатая, образующаяся при охлаждении на воздухе от  $1000$ – $1100^{\circ}\text{C}$ ;
- грубопластинчатая, формирующаяся при охлаждении от  $1100^{\circ}\text{C}$  в печи.

Различия в структуре определяют два фактора. Во-первых, переход через температуру полиморфного  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$  превращения, которая для исследованных сплавов составляет: ВТ3-1 -  $970^{\circ}\text{C}$ , ВТ8 -  $990^{\circ}\text{C}$ , ВТ9 -  $980^{\circ}\text{C}$ . При превышении этих

температур сплав титана имеет только крупнозернистую  $\beta$ -фазу, размер зерна которой возрастает по мере повышения температуры и времени выдержки. Охлаждение  $\alpha + \beta$  - титановых сплавов из однофазной  $\beta$ -области приводит к формированию в них пластинчатой структуры внутри бывших  $\beta$ -зерен. При нагреве ниже этих температур сохраняется двухфазная  $\alpha + \beta$  область и при последующем охлаждении формируется мелкозернистая глобулярная структура.

Во-вторых, скорость охлаждения. Быстрое охлаждение на воздухе мало меняет исходную структуру, при медленном охлаждении в печи изменение структуры становится уже заметным. После отжига при температурах двухфазной области и охлаждения со скоростью менее 10 град./сек. размеры структурных составляющих могут возрасти более, чем в 1.5 раза. При формировании пластинчатой структуры снижение скорости охлаждения до 2 град./сек. увеличивает толщину пластины до 3-х раз.

Будем рассматривать нагрев и охлаждение титановой заготовки, в которой температура полиморфного превращения и скорость охлаждения будут контролировать связь структурных параметров с механическими свойствами при решении деформационной задачи.

При моделировании технологических процессов важно определить рамки применимости математической модели, т.е. сформулировать условия и ограничения, при которых она работает.

- Будем считать, что процессы фазовых переходов будут близкими к равновесным, различные метастабильные ситуации, которые могут реализоваться для некоторых специальных сплавов, рассматриваться не будут.
- Температуру полиморфного превращения и "критическую" скорость охлаждения будем рассматривать как фиксированные параметры данного сплава, хотя в действительности они представляют собой некоторые интервалы со сложными взаимодействиями.
- Будем учитывать изменение структурных параметров только в процессе охлаждения, считая, что влияние скорости нагрева на структуру можно исключить последующей выдержкой.

Основные отличия в определяющих соотношениях деформационной задачи будут связаны с учетом структурных параметров. Для титана соотношения Холла-Петча выполняются достаточно строго [1]. Дополнительное упрочнение сплава с глобулярной структурой из-за уменьшения величины зерна от диаметра  $d_1$  до  $d_2$  можно оценить по уравнению Холла-Петча, преобразованного к виду

$$\Delta S = k(d_2^{-1/2} - d_1^{-1/2}),$$

где  $\Delta S$  - разность пределов текучести сплава с величиной зерна  $d_1$  и  $d_2$  соответственно. Аналогичное соотношение справедливо для сплавов титана с пластинчатой структурой, где в качестве структурного параметра используется межпластинчатое расстояние  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$

$$\Delta S = k(\Delta_2^{-1/2} - \Delta_1^{-1/2}).$$

Существенное отличие этих двух структурных состояний будет заключаться в том, что временное сопротивление  $\sigma_B$  для них достигается при существенно различных деформациях  $\epsilon_B$ .

## Система уравнений

При моделировании процессов теплопереноса и деформирования в первую очередь необходимо сопоставление характерных времен протекания этих процессов. Это сопоставление определяет некоторую градацию этих задач по уровню связности. Рассматриваемый случай относится к классу задач, для которого характерные времена деформации существенно меньше, чем такие времена для теплопереноса; к этому классу

можно отнести классические задачи упругости и пластичности при низких и средних температурах, где деформация с точки зрения реального времени происходит мгновенно, здесь допустимо разделение задач деформирования и теплопроводности;

Процесс деформирования будем описывать системой уравнений малых упругопластических деформаций

$$\nabla_j S_{ij} = 0; \tag{1}$$

$$e_{ij} = (\nabla_i u_j + \nabla_j u_i) / 2; \tag{2}$$

с определяющими уравнениями для процессов простого нагружения, учитывающими зернограничное упрочнение

$$s_{ij} = \frac{E}{(1-2\nu)} e^e d_{ij} + a e_{ij}; \tag{3}$$

$$s_i < s_T \Leftrightarrow a = 2m; \tag{4}$$

$$s_i \geq s_T \Leftrightarrow e^p = 0; \tag{5}$$

$$T < T_p \Leftrightarrow a = \frac{2(s_T + k(d_2^{-1/2} - d_1^{-1/2}) + m_d (g_i - g_T)^{1/2} - n_d (g_i - g_T)^2)}{3g_i}; \tag{6}$$

$$\dot{T}/\dot{T} < q^* \Leftrightarrow k = k_d; \tag{7}$$

$$\dot{T}/\dot{T} \geq q^* \Leftrightarrow k = 0; \tag{8}$$

$$T \geq T_p \Leftrightarrow a = \frac{2(s_T + k(\Delta_2^{-1/2} - \Delta_1^{-1/2}) + m_\Delta (g_i - g_T)^{1/2} - n_\Delta (g_i - g_T)^2)}{3g_i}; \tag{9}$$

$$\dot{T}/\dot{T} < q^* \Leftrightarrow k = k_\Delta; \tag{10}$$

$$\dot{T}/\dot{T} \geq q^* \Leftrightarrow k = 0; \tag{11}$$

здесь  $S_{ij}$  и  $e_{ij}$  компоненты тензоров напряжений и деформаций;  $S_i$  и  $g_i$  - соответствующие интенсивности;  $e_{ij}$  - компоненты девиатора деформаций;  $E$  - средняя деформация;  $s_T$  - предел текучести;  $T_p$  - температура полиморфного превращения;  $q^*$  - скорость охлаждения, при которой начинаются изменения размеров структурных параметров  $d$  - размеров зерен,  $\Delta$  - размеров межпластинчатого расстояния;  $m_d$  и  $m_\Delta$ ,  $n_d$  и  $n_\Delta$  определяются по формулам

$$m_d = \frac{S_1 - s_T}{(g_{dB} - g_T)^{1/2}}; m_\Delta = \frac{S_1 - s_T}{(g_{\Delta B} - g_T)^{1/2}}; n_d = \frac{S_2 - s_T}{(g_{dB} - g_T)^2}; n_\Delta = \frac{S_2 - s_T}{(g_{\Delta B} - g_T)^2}, \tag{12}$$

где

$$S_1 = \frac{(4S_B - s_T)}{3}; S_2 = \frac{(2s_T + S_B)}{3},$$

и отличаются между собой тем, что временное сопротивление  $S_B$  для различных структурных состояний достигается при различных значениях деформации. Условие (6) определяет характер зернограничного упрочнения для сплава с глобулярной структурой, причем для невысоких скоростей охлаждения - условие (7), зависимость от размера зерна существует, а для быстрого охлаждения - условие (8), структура не влияет на механические свойства. Аналогично, условия (9)-(12) определяют параметры зернограничного упрочнения для сплавов с пластинчатой структурой.

Для решения задачи деформирования необходимо определить из эксперимента параметры  $S_T, S_B, k_d, k_\Delta$ , а проверку условий  $T < T_p$  и  $\frac{\partial T}{\partial t} < Q_0$  осуществить на основе решения температурной задачи.

Для моделирования процессов нагрева и охлаждения будем решать обычную задачу теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T$$

с граничными условиями третьего рода при охлаждении на воздухе (в воде)

$$a \frac{\partial T}{\partial n} = b(T - T_B)$$

и первого рода при охлаждении в печи

$$T = f(t).$$

В решении температурной задачи нас будет интересовать температура полиморфного превращения, которая контролирует тип структуры, и скорость охлаждения, которая контролирует размеры структурных параметров.

Зависимости этих параметров от скорости охлаждения известны [1]. На рис.1 представлен пример такой зависимости. Существенное изменение размеров структурных

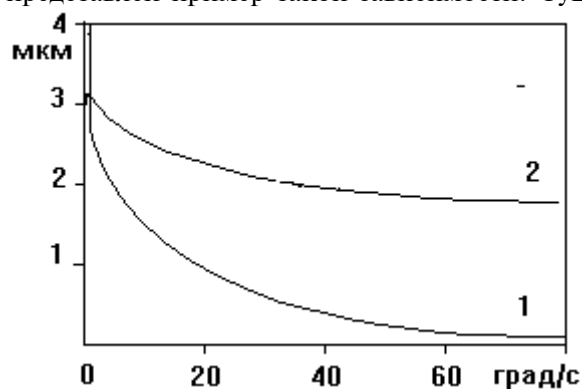


Рис.1. Влияние скорости охлаждения на толщину пластины: 1 - после охлаждения с 1100 С, 2 - после охлаждения с 900 С.

деформаций титановых сплавов ВТ8 и ВТ9 для четырех случаев предварительной термообработки: 1) нагрев до 1100<sup>0</sup>С и последующее охлаждение в печи; 2) нагрев до 1100<sup>0</sup>С и последующее охлаждение на воздухе; 3) нагрев до 900<sup>0</sup>С и последующее

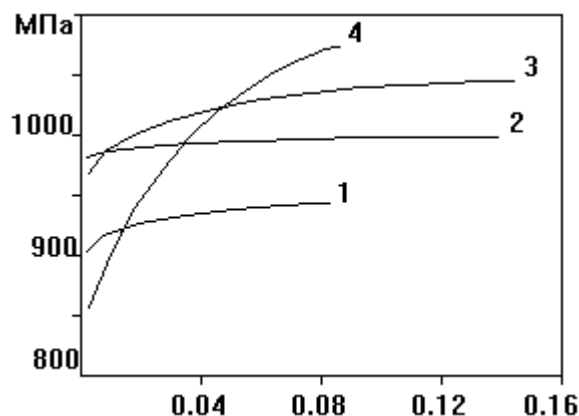


Рис.2. Кривые упрочнения для сплава ВТ9 охлажденного: 1- с 1100 С в печи, 2- с 900 С в печи, 3- с 900 С на воздухе, 4- с 1100 на воздухе.

параметров происходит при скоростях охлаждения меньше 20 град/с В этот интервал попадает охлаждение в печи и охлаждение на воздухе. При интенсивном охлаждении в воде структурные параметры меняются мало. Таким образом, в качестве  $Q^*$  в соотношениях (7), (8) принята величина 20 град/с. Температура полиморфного превращения для рассмотренных титановых сплавов находится в пределах. Зная эти зависимости и характер изменения предела текучести и временного сопротивления [2], на основе модели (3)-(11) были рассчитаны параметры физических уравнений связи напряжений и деформаций.

и последующее охлаждение на воздухе.

На рис.2 представлены соответствующие графики для титанового сплава ВТ9. Отличия при разных режимах термообработки очень существенны, хотя мы имеем дело с одним и тем же сплавом (ВТ9) при одной и той же комнатной температуре. Не проводя предварительных расчетов, уже по этим графикам мы можем сделать некоторые выводы. Например, для охлажденного с 900<sup>0</sup>С в печи титанового сплава дальнейшая штамповка противопоказана, т.к. реализуется ситуация почти идеальной пластичности, а для охлажденного с 1100<sup>0</sup>С на воздухе

сплава наиболее предпочтительна, т.к. возникает максимальное упрочнение [3]. Различия в напряженно-деформированном состоянии можно продемонстрировать на примере.

### Титановая цилиндрическая деталь ( заклепка) под нагрузкой

В качестве примера будем рассматривать цилиндрическую деталь (заклепку) под нагрузкой, которая вызывает напряжения, превышающие предел текучести. В задачу будет входить определение предварительного режима термической обработки детали из четырех рассмотренных выше, который для заданного нагружения обеспечивает минимальный уровень напряжений и максимальный ресурс пластичности.

Будем рассматривать механическую задачу, описываемую системой уравнений (1)-(11), т.е. деформирование стационарное, деформации малые, нагружение простое. Соотношения (7),(9),(12) в определяющих уравнениях для четырех рассмотренных режимов термообработки задают кривые нагружения, изображенные на рис.2. На

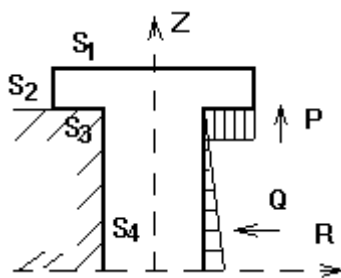


Рис.3. Заклепка под статической нагрузкой.

цилиндрическую деталь действуют силы  $P$  и  $Q$ , как показано на рис.3. Использовалась осевая и радиальная симметрия, граничные условия заданы следующим образом:

$$\text{на } S_1, S_2: f_R = f_Z = 0;$$

$$\text{на } S_3: u_R = 0; f_Z = P;$$

$$\text{на } S_4: f_R = Q(1 - R/L); u_Z = 0.$$

Решение деформационной задачи осуществлялось с помощью алгоритма, основанного на совместном использовании метода граничных элементов и вариационного метода.

На рис.4а представлены распределения интенсивностей напряжений вдоль оси  $OZ$  при  $R=0.5$  для четырех вариантов предварительной термической обработки при значениях внешних нагрузок  $P = 370$  МПа,  $Q = 20$  МПа.

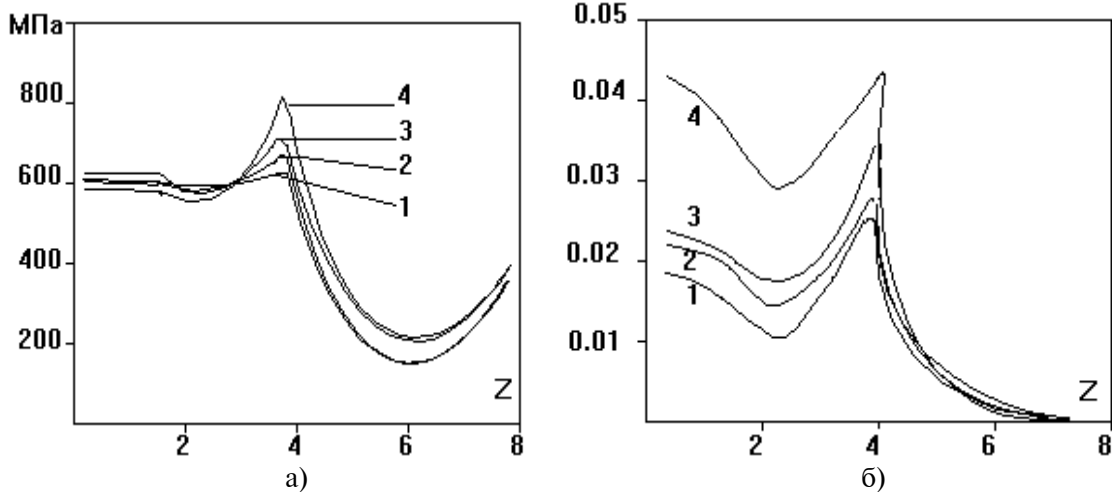


Рис.4. Интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) вдоль оси  $OZ$  при  $R=0.5$  при: 1- охлаждения с  $900$  С на воздухе, 2- с  $900$  С в печи, 3- с  $1100$  С на воздухе, 4- с  $1100$  в печи.

Как видно из графиков, наименьший уровень напряжений, а значит наиболее благоприятная ситуация соответствует предварительному нагреву и последующему остыванию на воздухе, в результате которого образуется глобулярная структура. На рис.4б представлены распределения интенсивностей деформаций по этому же сечению

детали. Как видно из графиков, напряжения, возникающие в заклепке вызывают значительно большие деформации для титановых сплавов с пластинчатой структурой (охлажденные с  $1100^{\circ}\text{C}$ ), причем охлажденные в печи имеют максимальные деформации. Как видно из графиков, для рассматриваемого нагружения цилиндрической детали глобулярная структура наиболее предпочтительна.

### **Литература:**

1. Металлография титановых сплавов. / Под ред. Аношкина Н.Ф. и др. М.: Мир: Металлургия, 1980. 464 с.
2. Анисимова Л.И., Попов А.А. Связь характера разрушения с микроструктурой и свойствами  $\alpha+\beta$  - титановых сплавов. // МиТОМ. 1985. №12. С 45-48.
3. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688с.