

УДК 621.7.011.001

Огородников В. А.
Архипова Т. Ф.
Титов А. В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ В ПРОЦЕССЕ ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВОГО БЕРИЛЛИЯ

Крупногабаритные заготовки, изготовленные из порошкового бериллия, получают методами горячего прессования. В последующем из заготовок изготавливают различные изделия, используемые в авиастроении, в машиностроении и других отраслях промышленности. Ценные свойства бериллия как компонента сплавов были обнаружены в XX в., а уникальные ядерные – в начале 30-х гг. XX в. Обработка давлением приводит к определенной ориентации кристаллов Be. Это обуславливает анизотропию свойств. Механические свойства в направлении, перпендикулярном вытяжке, почти не меняются. Одним из недостатков, препятствующим широкому применению в качестве конструкционного материала, является его хрупкость [1] (особенно литого) при комнатной температуре. Наилучшими механическими свойствами обладает Be после теплой обработки давлением, которая проводится при температурах ниже температуры рекристаллизации. Температура рекристаллизации сплавов на основе бериллия изменяется в пределах от 700 до 900 °С в зависимости от степени деформации и времени выдержки. Рекристаллизационный отжиг повышает пластичность и уменьшает прочность Be. Совокупность механических и теплофизических характеристик бериллиевых сплавов в целом отличает их от других материалов и определяет высокую размерную стабильность в условиях возникновения температурных градиентов при эксплуатации изделий.

При охлаждении крупногабаритных заготовок, изготовленных из порошкового бериллия методами горячего прессования, могут возникать макротрещины. При механической обработке этих заготовок используют твердосплавный инструмент. Все деформированные полуфабрикаты имеют развитую текстуру деформации, вызывающую сильную анизотропию свойств. Последующая механическая обработка дополнительно осложняет представление об изменении остаточных напряжений и деформаций. Среди причин, определяющих появление макротрещин, основными являются: остаточные напряжения, температурные деформации и градиенты. Для предотвращения появления макротрещин в крупногабаритных заготовках из порошкового бериллия необходимо учесть указанные факторы в сочетании с высоким модулем упругости, анизотропией температурных коэффициентов линейного расширения материала, а также температурные градиенты, обусловленные режимами технологических операций.

В работе [2] исследован уровень остаточных напряжений 1-го рода для цилиндрических заготовок диаметром 1300 мм и высотой 230 мм. заготовки получены двукратным горячим прессованием. В этой же работе показано, что неравномерность пластической деформации, могущая явиться причиной появления остаточных напряжений, можно снизить путем термообработки, проводимой при температуре выше температуры рекристаллизации.

Удельная прочность (отношение прочности к плотности) у бериллия значительно выше, чем у авиационных сталей и сплавов на основе титана и алюминия. Из-за трудностей получения качественных отливок заготовки для изделий из бериллия готовят методами порошковой металлургии. В безокислительной среде Be измельчают в порошок и подвергают горячему прессованию в вакууме при 1140–1180 °С. Чем меньше зерна порошка бериллия, тем выше прочностные и пластические свойства металла.

Целью данной работы является установление температурных законов охлаждения бериллиевых заготовок, обеспечивающих качество изделий, получаемых путём механической обработки из охлажденных «таблеток».

Качество заготовок, полученных путём трепанации изделий из штампованной бериллиевой «таблетки» зависит от такого, например, технологического параметра, как режим охлаждения термообработанной бериллиевой заготовки.

Процесс охлаждения бериллиевой заготовки исследован после её выдержки при температуре 800 °С при вторичной окончательной термообработке.

Для установления режимов её охлаждения решали задачу термовязкоупругого тела. Рассмотрим основные соотношения термоупругопластичной модели. В середине заготовки скорости компонент тензора напряжений удовлетворяют равенствам:

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (i = 1, 2, 3). \quad (1)$$

На границе соотношения скоростей компонент тензора напряжений удовлетворяет граничным условиям:

$$\partial \dot{\sigma}_{ij} \beta_j = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (2)$$

где β_j – направляющие косинусы нормали к поверхности.

Скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{ij}$ связаны с компонентами скоростей соотношениями Коши:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (3)$$

Для упруго-ползучего тела компоненты скоростей деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^c + \dot{\varepsilon}_{ij}^T. \quad (4)$$

Скорости упругих деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ определяют путём дифференцирования соотношений закона Гука:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{\dot{s}_{ij}}{2G} + \delta_{ij} \frac{\dot{\sigma}}{K} - \frac{S_{ij}}{2G^2} \frac{dG}{dT} \dot{T} - \delta_{ij} \frac{\sigma}{K^2} \frac{dK}{dT} \dot{T}. \quad (5)$$

Скорость температурных деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^T = \alpha_{ij}(T) \dot{T}, \quad (6)$$

где T – абсолютная температура;

α_{ij} – компоненты тензора коэффициента линейного расширения.

Для описания ползучести частиц материала используем теорию упрочнения с одним структурным параметром [2]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^C = \frac{3}{2} \dot{\varepsilon}_u^C \frac{S_{ij}}{\sigma_u}, \quad (7)$$

где $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma$ – компонента девиатора напряжений;

σ – гидростатическое давление;

σ_u – интенсивность напряжений;

$\dot{\varepsilon}_{ij}^C$ – интенсивность скоростей деформации ползучести.

Закон упрочнения принимаем в виде:

$$\dot{\varepsilon}_u^C = \frac{Ae^{-\frac{\beta}{T}} \sigma_u^n}{q^m}, \quad (8)$$

где A, β, m, n – коэффициенты ползучести материала;

q – структурный параметр, характеризующий упрочнение материала в условиях ползучести.

Кинетическое уравнение для q имеет вид:

$$\frac{dq}{dT} = \dot{\varepsilon}_u^C - \mu(T)q = \frac{Ae^{-\frac{\beta}{T}} \sigma_u^n}{q^m} - \mu(T)q, \quad (9)$$

где $\mu(T)q$ – температурное упрочнение;

$\mu(T)$ – функция температуры и материала.

Упрочнение описывает второй член $\mu(T)q$ уравнения (9).

Проведенные соотношения и формулируют краевую задачу линейной теории упругости для неоднородного тела с начальными деформациями.

На основе приведённых соотношений (1)–(9) рассчитаны поля напряжений и деформаций при охлаждении осесимметричных заготовок, материал которых рассматривали как термовязкоупругое тело [2]. При расчётах использовали физико-механические характеристики материала, определённые экспериментально.

Температурную зависимость модуля упругости согласно [4] принимаем в виде:

$$E(t) = 3,178 \cdot 10^5 - 5,96 t. \quad (10)$$

Исходя из результатов экспериментальных исследований, выбран безопасный режим охлаждения неоднородности температурного поля, при котором максимальная разница температур возникает при температуре 450 °С. При этом максимальная разница температуры:

$$\Delta t = 80^\circ\text{C}.$$

Температура, при которой происходит выравнивание по объёму:

$$\Delta t = 200^\circ\text{C}.$$

Температурное поле задавали двумя законами: опорным режимом охлаждения (рис. 1):

$$t_{\text{оп}} = 800 \exp(-0,04\tau^{0,8}) \quad (11)$$

и законом отклонения от опорного режима:

$$\Delta t(\tau) = \Delta t_{\max} \frac{\tau}{\tau_m} \exp \left[\frac{1 - \left(\frac{\tau}{\tau_m} \right)^\gamma}{\gamma} \right]. \quad (12)$$

Для данного случая: $\tau_m = 22,9$ час; $\gamma = 1,898$; $\Delta t_{\max} = 80$ °С.

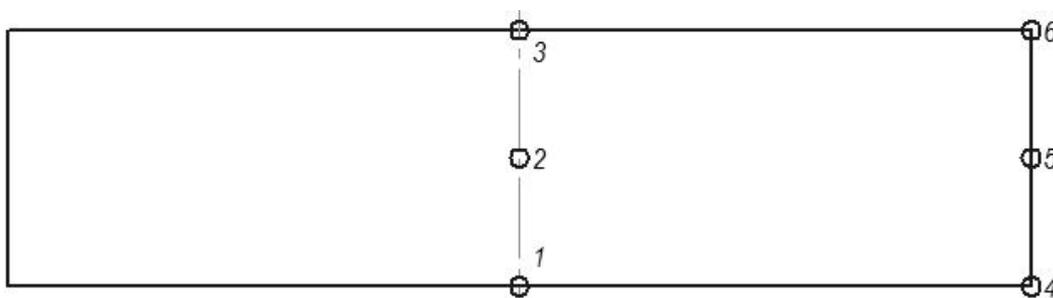


Рис. 1. Распределение реперных точек для определения температур

Считали, что во всех точках, в которых материал более интенсивно охлаждается, отклонение от опорного закона проходит синхронно. Опорный и реперный закон охлаждения показан на рис. 2.

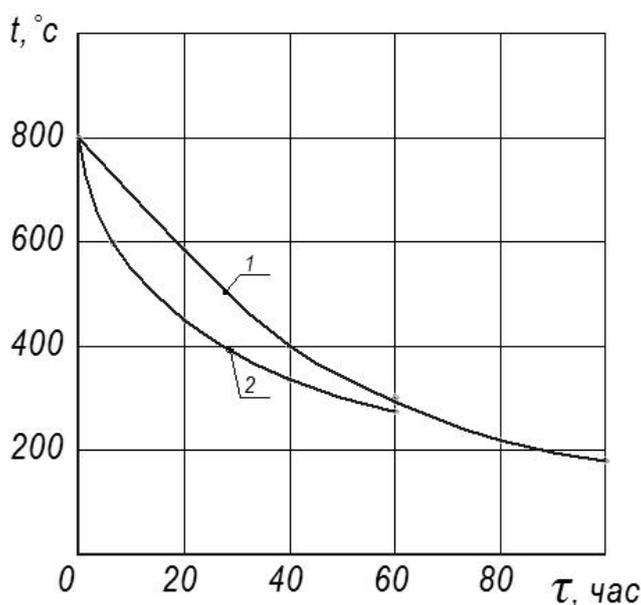


Рис. 2. Опорный закон охлаждения (кривая 1) и кривая изменения температуры одной из реперных точек (кривая 2)

Температурное поле в заготовке предполагали распределенным по осям z и r в виде парабол. На этой основе рассчитаны компоненты тензора остаточных напряжений σ_r , σ_u , σ_z , и τ_{rz} .

На рис. 3 приведены изолинии остаточных напряжений для рассматриваемого случая распределения температур в виде парабол по осям r и z .

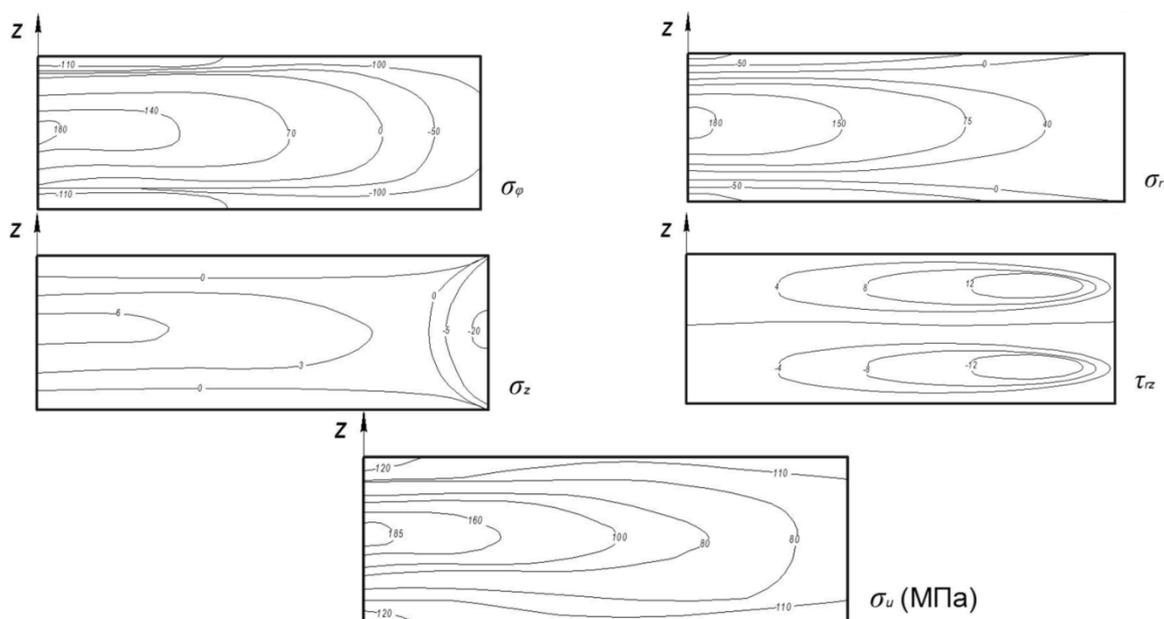


Рис. 3. Изолинии остаточных напряжений при $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Как следует из полученных результатов, в центре заготовки окружные остаточные напряжения являются растягивающими и достигают величины $\sigma_u = 180\text{ МПа}$. Эта же картина наблюдается в центре заготовки относительно радиальных напряжений.

ВЫВОДЫ

Поставлена краевая задача линейной теории упругости для неоднородного тела с начальными деформациями. Неоднородность тела связана с переменным модулем упругости, зависящим от неоднородности поля температур.

Разработана методика расчета остаточных напряжений и деформаций, возникающих при охлаждении осесимметричной упругоползучей заготовки.

Получены поля остаточных напряжений охлаждения бериллиевой заготовки.

Предложен режим охлаждения бериллиевой заготовки, предотвращающий её разрушение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование напряжений I-го рода в крупно-габаритных штамповках из порошкового бериллия / В. А. Огородников, М. А. Рвачев, И. О. Сивак и др. // *Вопросы атомной науки и техники*. – 1989. – Вып. 9(30). – С. 18–22. – (Серия «Материаловедение и новые материалы»).
2. Работнов Ю. Н. *Механика деформируемого твердого тела* / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 744 с.
3. Бериллий. *Наука и технология* / пер. с англ. ; под ред. Тихинского Г. Ф., Папилова Н. Н. – М. : Металлургия, 1984. – 642 с.

Огородников В. А. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ;

Архипова Т. Ф. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ;

Титов А. В. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ».

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: va.ogorodnikov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.11.2013 г.