

Раздел первый

ЧИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 669.725.-415/416:621.771

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДЕФОРМИРОВАННОГО БЕРИЛЛИЯ ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ

*И.И. Папиров, В.С. Шокуров, А.И. Пикалов, А.А. Николаенко
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: papirov@kipt.kharkov.ua*

Приведены результаты изучения возможности улучшения механических свойств и пластичности листов из литого дистиллированного бериллия путем использования пластической деформации и термообработки.

Целью данного исследования является изучение возможности улучшения механических свойств и пластичности листов из литого дистиллированного бериллия при использовании пластической деформации и термообработки.

Путем высокотемпературной прокатки со строго контролируемыми отжигами получен листовый бериллий с высокими механическими характеристиками. Высокотемпературная деформация бериллия способствует повышению пластичности как в плоскости листа, так и в поперечном направлении. Электронно-микроскопические исследования показали, что повышение механических свойств бериллия связано с формированием в процессе высокотемпературной деформации ячеистой субструктуры в листах бериллия.

Как известно, основным недостатком бериллия является низкотемпературное охрупчивание. Для повышения пластических характеристик металла используют сочетание высокой чистоты с созданием мелкозернистой или субзернистой структуры. Постоянно растущие требования к механическим характеристикам прокатанного бериллия нуждаются в дальнейшем изучении влияния условий деформации и термообработки материала на его структуру и свойства [1-3].

Листы из литого прокатанного бериллия обладают рядом преимуществ по сравнению с прочными, но менее пластичными и сильно текстурированными листами из порошкового металла [3]. Они имеют повышенное сопротивление распространению трещин, лучшую обрабатываемость и формуемость, обеспечивают более высокое качество сварных швов. Благодаря меньшей степени текстуры, по сравнению с прокатанным в аналогичных условиях порошковым металлом, листы из литого бериллия обладают более высокой пластичностью в третьем направлении (в направлении толщины листа) и имеют лучшие характеристики при испытании на изгиб.

Целью большей части исследований в области прокатки бериллия является получение листов с повышенной пластичностью в направлении, перпендикулярном плоскости листа. Поскольку обычная прокатка и прокатка в двух направлениях не

обеспечивают трехмерной пластичности бериллия, это приводит к дополнительным ограничениям в применении листового металла. В США опубликовано несколько десятков статей и отчетов, в которых изыскивается возможность повышения пластичности листов бериллия в третьем направлении. Установлено, в частности, что низкая пластичность листов бериллия в третьем направлении связана с образованием текстуры деформации [4].

Условия прокатки и свойства листов бериллия определяются сортом и чистотой исходного материала. Чем выше содержание примесей, тем меньше допустимая величина обжатия и выше температура прокатки. Горячую прокатку порошкового бериллия осуществляют при температурах 900 °С и выше. Суммарные обжатия при этом достигают 30:1.

Листы, как правило, прокатывают в одном направлении с небольшой поперечной прокаткой. Механические свойства горячекатаных листов обычно на 20...40% ниже, чем у листов после теплой прокатки [5].

Средний размер зерна у горячекатаных листов гораздо выше, чем после теплой прокатки, что является причиной снижения их механических свойств.

Теплую прокатку бериллия обычно ведут при температурах 650...790 °С. Обычное число проходов – 20...30, суммарное обжатие – (16...18):1. Для снятия напряжений прокатанные листы отжигают при 760 °С [5].

Чир и др. [2] раскатывали слитки электролитического бериллия размером 150x150x75 мм сначала при температурах 950...1050 °С для разрушения крупнокристаллической структуры литья, а затем при более низких температурах, чтобы предотвратить рост зерен. Отмечается, что с увеличением скорости деформации при постоянной температуре интенсивность текстуры деформации заметно уменьшается. Большие обжатия за проход приводят к увеличению разнотекстурности материала. Поэтому рекомендуется использовать небольшие обжатия (< 15%) и частый нагрев заготовок.

В работе [6] слитки бериллия размерами 280x280x380 мм, полученные методом донного разлива или центробежного литья, раскатывали вначале при 1020 °С, а затем при 780 °С. Обжатие за проход

составляло 10...15%. После прокатки с суммарным обжатием 85...90% оболочки из нержавеющей стали удаляли, и листы докатывали без оболочек до толщины 0,05...3,8 мм.

В работе [7] использована теплая прокатка литых заготовок. После предварительной деформации заготовок при 600...800 °С с суммарными обжатиями от 4:1 до 18:1 листы прокатывали при более низких температурах (250...600 °С). Из-за быстрого наклепа при низких температурах прокатки величина обжатия не должна превышать 5...10% за проход. С понижением температуры прокатки и увеличением степени деформации средний размер зерна в отожженных заготовках значительно уменьшался.

Структура листов чистого бериллия существенно зависит от условий отжига. Ложеро [7] указывает, что после отжига теплопрокатанных листов электролитического бериллия при 700...750 °С рост зерен незначителен, но при температуре прокатки 950 °С даже кратковременный отжиг приводит к быстрому росту зерен. Поэтому после прокатки листы отжигали при 750 °С в течение 1 ч и медленно (100 град/ч) охлаждали до комнатной температуры.

При оптимальной температуре прокатки увеличение степени обжатия, как правило, сопровождается увеличением относительного удлинения в плоскости листа и уменьшением пластичности в направлении, перпендикулярном этой плоскости. Это является результатом текстурного эффекта и следует из характера пластической деформации монокристаллов [8].

Из анализа опубликованных результатов, касающихся влияния температуры прокатки на свойства листов бериллия, следует, что оптимальные условия деформации различны для разных сортов металла. С одной стороны, снижение температуры прокатки сопровождается улучшением прочностных характеристик за счет увеличения наклепа или уменьшения величины зерна после отжига. С другой стороны, при низких температурах увеличивается вероятность образования микротрещин и уменьшается величина допустимого обжатия.

При сравнении механических свойств деформированных материалов необходимо учитывать субструктурный фактор – характер сформированной дислокационной субструктуры, который играет решающее значение для обеспечения повышенных свойств материала. В работах [9, 10] выяснено, что при испытании на изгиб более текстурированные прокатанные листы бериллия в некоторых случаях имели более высокую пластичность. Электронно-микроскопические исследования показали, что этот эффект связан не с текстурой, а с субзеренной структурой материала. Сформированные в процессе пластической деформации и отжига мелкие субзерна (1...10 мкм) при достаточно больших углах взаимной ориентации (3...5°) играют роль обычных зерен. При этом характерное для полностью рекристаллизованного состояния металла транскристаллитное разрушение в материале с развитой субзеренной структурой менялось на межзеренное. Следовательно, пластичность материала определяется не только количеством участвующих в деформации

систем скольжения, но и в значительной степени легкостью зарождения трещин и характером их распространения в металле.

Влияние термообработки на кинетику выделений второй фазы из пересыщенного твердого раствора и механические свойства литого бериллия сказывается, главным образом, при высокотемпературной деформации. Наиболее подробно кинетика процесса выделения избыточных доз в литых деформированных бериллиевых листах изучена в работе [11], в которой исследовано влияние температуры и продолжительности отжига закаленных бериллиевых листов на характер выделения второй фазы. Температура закалки составляла 900 °С, старение проводилось в интервале 500...780 °С. Скорость роста выделений увеличивалась с увеличением температуры. Ориентированные относительно матрицы гексагональные пластины FeBe₁₁ уже после 5 мин старения при температуре 780 °С теряли ориентационное соответствие с матрицей в результате увеличения размеров, тогда как при температуре 650 °С частицы выделения оставались когерентными с матрицей до 10 ч выдержки. Электронная дифракция показывает, что плоскость (111) когерентных частиц, которые предшествуют выделениям типа AlFeBe₄ с гранецентрированной кубической решеткой, параллельна плоскости (0001) матрицы бериллия. Отжиг образцов в течение 15...30 мин при температуре 1000 °С не приводит к полному растворению включений AlFeBe₄.

Левин с сотрудниками [12] изучили кинетику выделений в сплаве Be-Fe, содержащем 0,95% Fe в интервале температур старения 400...500 °С. Низкотемпературное старение способствовало однородному выделению частиц FeBe₁₁ (плотность частиц выделений внутри матрицы была приблизительно такой же, как и на границах зерен). Размер выделений не превышал 1000 Å. Испытания образцов на растяжение и сжатие при 20 °С после различных режимов старения показали, что они обладают низкими пластическими характеристиками. Относительное удлинение при растяжении не превышало 0,5%. Возможно, низкая пластичность испытанных образцов связана не с выделениями второй фазы из пересыщенного твердого раствора, а является следствием высокой скорости закалки исследуемых образцов. Процесс старения приводит к существенному изменению свойств как материала, так и границ зерен и поэтому должен оказывать определенное влияние на характер последующей пластической деформации металла.

Влияние старения на характер пластической деформации необработанного и состаренного бериллия в области температур 20...300 °С изучали Бастьен и Пуанту [13]. Авторы отмечают, что особенностью предварительно состаренного материала является более однородная пластическая деформация матрицы, и межзеренное разрушение материала происходит при больших деформациях, чем в случае исходного металла.

Настоящая работа состоит из двух частей: первая посвящена влиянию термомеханической обработки литого дистиллированного бериллия на субструктуру

ру и механические свойства; цель второй части работы заключается в исследовании влияния старения на формирование структуры в процессе последующей пластической деформации и на механические свойства литого бериллия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе использовали выплавленные в вакууме слитки бериллия чистотой около 99,9%. Состав материала указан в табл. 1.

Содержание примесей в исследованном бериллии (содержание примесей, $\% \cdot 10^{-2}$)

Примеси	Mn	Mg	Al	Cu	Fe	Ni	Cr	Si	Mo	O	C
Содержание	0,3	0,2	0,3	0,3	0,14	0,1	0,1	0,3	0,1	0,3	2

Таблица 1

Для сравнения результатов механических свойств прокатанных листов приготавливали контрольные образцы по режимам, которые наиболее часто используют для прокатки литого дистиллированного бериллия. Обжатие за проход составляло 10...15% при температуре прокатки 600 °С. Суммарное обжатие составляло 80%. Последеформационный рекристаллизационный отжиг проводили при температуре 750 °С в течение 1 ч.

Механические испытания полученных образцов проводили на растяжение и изгиб. Образцы на растяжение имели плоскую форму с длиной рабочей части 10 мм и поперечным сечением около 4 мм². Образцы на изгиб размерами 4x1x30 мм испытывали по трехточечной схеме нагружения. Радиус изгибающего ножа составлял 2 мм, а расстояние между опорами – 18 мм. Скорость перемещения подвижного захвата испытательной машины на растяжение и

изгибающего ножа при испытании на изгиб составляла 0,2 мм/мин. Структурные исследования проводили методами оптической и электронной микроскопии.

Исходные заготовки, предварительно подвергнутые гомогенизации при 1000 °С в течение 1 ч, прокатывали при температуре 870 °С. Время выдержки заготовки между двумя проходами при этой температуре строго контролировали и изменяли с учетом возрастания скорости прогрева заготовки по сечению. Образцы исследовали после 10 проходов, что соответствовало 80% деформации.

В табл. 2 приведены результаты механических испытаний образцов, прокатанных при температурах 600 и 870 °С. Видно, что высокотемпературная деформация способствует одновременному увеличению прочностных и пластических характеристик при испытании на растяжение и изгиб.

Таблица 2

Механические свойства прокатанного бериллия

Температура прокатки, °С	Вид испытаний						
	Растяжение				Изгиб		
	σ_b , кг/мм ²	σ_T , кг/мм ²	δ , %	Ψ , %	σ_b , кг/мм ²	σ_T , кг/мм ²	α , град
600	32,1	24,7	5,2	4,3	90	36	32
870	44,5	31,4	10,5	8,6	145	51	52

Предел текучести σ_T при испытании на растяжение у образцов, прокатанных при температуре 870 °С, увеличился на 40%, а значения относительного удлинения δ и поперечного сужения Ψ возросли в 2 раза.

Как указано выше, увеличение пластичности бериллия, прокатанного в двух направлениях, в плоскости листа сопровождается уменьшением пластичности в третьем направлении – поперек плоскости листа, что связано с влиянием текстуры. Увеличение угла изгиба на 60% после высокотемпературной прокатки свидетельствует об одновременном росте пластичности в плоскости листа и в поперечном направлении.

После прокатки зерна вытягиваются в направлении прокатки, причем внутри них заметны небольшие области слабой разориентации (рис. 1).



Рис. 1. Структура бериллия после прокатки при температуре 850 °С. Суммарная степень деформации 80%; x 115

Электронно-микроскопические исследования показали, что деформированные зерна состоят из субзерен размерами 3...4 мкм с достаточно большими углами взаимной разориентации, достигающими 7...10° и более (рис. 2). Для субструктуры контрольных образцов, температура прокатки которых составляла 600 °С, характерно наличие высокой плотности дислокаций леса, а стенки ячеек или субзерен являются сильно размытыми (рис. 3).

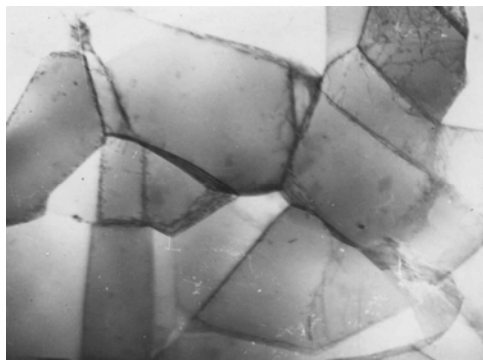


Рис. 2. Субструктура бериллия после прокатки при температуре 870 °С. Суммарная степень деформации 80%; x 13000

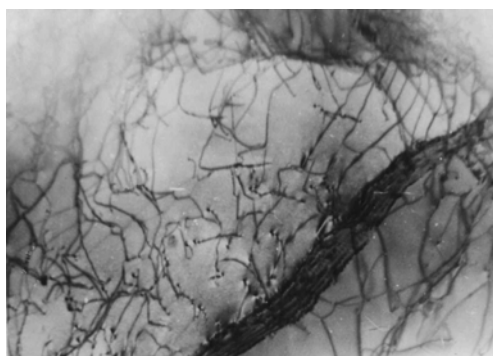


Рис. 3. Субструктура бериллия после прокатки при температуре 600 °С. Суммарная степень деформации 80%; x 20000

Особенность высокотемпературной прокатки бериллия состоит в том, что после каждого обжатия и последующей кратковременной выдержки материала при высокой температуре структурное состояние материала находится на уровне начальных стадий процесса рекристаллизации – на стадии формирования ячеек [14]. Следующий за деформацией высокотемпературный отжиг приводит к некоторому росту ячеек или субзерен с одновременным снижением плотности дислокаций внутри них и увеличением угла их взаимной разориентации. При этом границы между субзернами, разориентация которых превышает 3...5°, становятся непреодолимыми для скользящих дислокаций и играют роль границ зерен.

Такое структурное состояние эквивалентно ультрамелкозернистому материалу и обеспечивает высокий уровень механических свойств. Действительно, важнейшие структурно-чувствительные характеристики металлов – предел текучести σ_T , разрушающее напряжение σ_p и температура хладноломкости T_x – зависят от величины зерна (субзерна, ячейки) и связаны с ней известными соотношениями

Холла-Петча и Петча-Стро и Армстронга [8], которые имеют вид соответственно:

$$\begin{aligned}\sigma_T &= \sigma_{от} + k_T d^{-S}; \\ \sigma_p &= \sigma_{ор} + k_p d^{-S}; \\ T_x &= A + B d^S,\end{aligned}$$

где $\sigma_{от}$, $\sigma_{ор}$, k_T , k_p , A и B – постоянные, а d – размер зерна (субзерна).

Эффект повышения механических свойств бериллия, достигаемый в результате высокотемпературной деформации, можно получить чередованием деформации при более низких температурах (500...600 °С) с кратковременным высокотемпературным отжигом после каждого обжатия. Единичные высокотемпературные отжиги после больших степеней деформации являются малоэффективными и к существенному повышению механических свойств, особенно пластичности, не приводят.

Низкотемпературная деформация бериллия (до-рекристаллизационные температуры) формирует ячеистую структуру в матрице «старых» зерен, но сохраняет «старые» межзеренные границы (рис. 4), по которым может беспрепятственно распространяться зародившаяся в материале трещина. Таким образом, хотя субструктуры материалов, подвергнутых высокотемпературной деформации или комбинации низкотемпературной деформации и отжига, могут быть подобны, характер разрушения в обоих случаях существенно различен.



Рис. 4. Структура бериллия после прокатки при температуре 600 °С; x 560

Следует отметить одну интересную особенность бериллиевых листов, полученных высокотемпературной прокаткой. Оказалось, что в таких листах в процессе последующей выдержки в интервале температур 500...600 °С практически не обнаруживается эффект старения, связанный с выделением примесей и снижением предела текучести.

Ячеистая структура, которая формируется в бериллии, характеризуется очень развитой поверхностью границ, причем последние являются наиболее благоприятными местами выделения примесей. Высокие температуры деформации, ускоряя процессы диффузии, обеспечивают перераспределение примесей с образованием выделений на границах ячеек. В результате концентрация примесей в матрице уменьшается. Поэтому прирост пластичности, наблюдаемый у горячекатаных образцов, кроме структурного фактора связан с рафинированием матрицы от примесей.

Рассмотрим далее влияние на структуру и свойства прокатанного бериллия различных термообра-

боток. Исходные заготовки бериллия, обработанные по режимам, описанным выше, подвергали гомогенизации при температуре 1000 °С в течение 1 ч. Затем заготовки отжигали при 500 и 600 °С в течение 0,5...4 и 40 ч соответственно. После старения следовала деформация прокаткой при температуре 500 °С. Суммарное обжатие составляло 80%. После

прокатки образцы обжигали при 750 °С в течение 1 ч.

В табл. 3 приведены механические свойства образцов при испытаниях на растяжение и изгиб при 20 °С в зависимости от режимов старения, предшествующего деформации, и здесь же представлены механические свойства контрольных образцов, режимы обработки которых описаны выше.

Таблица 3

Влияние старения на механические свойства листов бериллия

Обработка	Вид испытания						
	Растяжение			Изгиб			
	σ_B , кг/мм ²	σ_T , кг/мм ²	δ , %	Ψ , %	σ_B , кг/мм ²	σ_T , кг/мм ²	α , град
Контрольные образцы	32,1	24,7	5,2	4,3	90	36	32
Старение 600 °С, 0,5 ч	38,0	27,1	7,3	5,6	111	43	42
Старение 600 °С, 1 ч	–	–	–	–	94	38	30
Старение 600 °С, 4 ч	–	–	–	–	77	27	17
Старение 500 °С, 40 ч	41,0	29,7	8,5	7,6	121	55	48

Можно отметить большую чувствительность исследованного материала к режимам старения, изменение которых существенно влияет на механические свойства, особенно на пластичность.

Для пластической деформации бериллия характерна крайняя неоднородность, обусловленная большим различием напряжений сдвига в различных кристаллографических системах [8]. Например, критические напряжения сдвига в системе (1122) <1123> и в базисной плоскости (0001) по оценкам отличаются более чем на 2...3 порядка. Неоднородность деформации поликристаллов приводит к неоднородному формированию субструктуры в различных зернах, а после рекристаллизации – к разнотерности. По мере повышения температуры деформации указанная анизотропия напряжений сдвига уменьшается, и в этом смысле высокие температуры деформации должны быть предпочтительными как для создания оптимальной субструктуры, так и для улучшения свойств. Но с увеличением температуры деформации параллельно с эффектом снижения анизотропии напряжений сдвига в обратном направлении действуют два других фактора – рост зерен и межзеренное скольжение. При высоких температурах деформации напряжение скольжения по межзеренным границам становится ниже, чем напряжения сдвига для вторичных систем скольжения. В результате некоторые зерна оказываются слабодеформированными, т. е. имеют слабо развитую субструктуру.

Одной из возможностей упрочнения границ зерен и торможения скольжения по границам является выделение на границах вторичных фаз в результате термообработки. Кинетика выделений вторичных фаз из пересыщенного твердого раствора такова, что с увеличением температуры старения выделения образуются преимущественно на границах зерен. Низкие температуры старения, наоборот, будут способствовать их гомогенному выделению. Наши исследования показали, что при выбранных режимах старения (600 °С, 0,5 ч и 500 °С, 40 ч) достигается

равный размер выделений второй фазы (около 1500...2000 Å) (рис. 5).

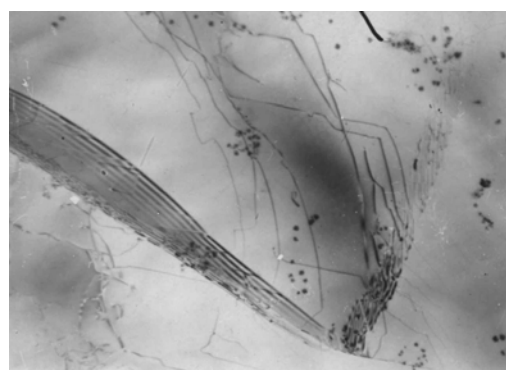


Рис. 5. Субструктура бериллия, термообработанного перед пластической деформацией. Старение при 500 °С в течение 40 ч; $\times 18000$

Как видно из табл. 3, более низкая температура старения (500 °С, 40 ч), предшествующая деформации, способствует достижению более высоких механических свойств. Действительно, при одинаковом размере выделившихся частиц примеси, при низких температурах старения достигается более высокая их плотность. Поэтому снижение температуры старения при одновременном упрочнении границ зерен приводит к большему рафинированию матрицы от примесей, облегчая ее пластическую деформацию.

Пластическая деформация бериллия с предварительно упрочненными границами приводит к более однородному деформированию в объеме материала. Средние значения микротвердости у образцов, подвергнутых старению непосредственно после деформации, оказались на 15% выше, чем у контрольных образцов. При этом разброс измеренных значений микротвердости существенно ниже.

Пластическая деформация термообработанного материала приводит к уменьшению величины зерна после рекристаллизационного отжига до 17 мкм по

сравнению с 28 мкм для контрольных образцов. Очевидно, что одной из причин повышения механических свойств образцов, термообработанных перед деформацией, является уменьшение средней величины зерна. Как показывают результаты проведенного исследования, эффект термообработки на формирование структуры и субструктуры бериллия в процессе последующей пластической деформации в основном зависит от размера выделившихся из твердого раствора частиц примеси. Увеличение продолжительности времени старения при 600 °С до 4 ч не только снимает эффект повышения механических свойств, но и приводит к сильному последовательному охрупчиванию образцов. Угол изгиба снижается до 17° по сравнению с 32° для контрольных образцов. Увеличение размера выделившихся частиц примеси приводит также к снижению предела текучести. С увеличением времени старения образцов при 600 °С от 1 до 4 ч происходит коагуляция и рост выделений. Структурные исследования показывают, что в матрице таких образцов имеются выделения второй фазы, имеющие размеры до нескольких микрометров. Проведенное исследование влияния степени дисперсности выделений на прочностные характеристики показало, что предел текучести обратно пропорционален квадратному корню из расстояния между частицами. Этот результат находится в хорошем соответствии с моделью, предложенной в работе [15], в которой предел текучести материала связывается с петлями дислокаций вокруг частиц выделений. Коагуляция и рост выделений второй фазы в состаренном материале приводят к разупрочнению границ зерен, а при последующей пластической деформации сильно возрастает плотность дислокаций вблизи крупных выделений в матрице (рис. 6), и поэтому скорость упрочнения в таком материале высока. Кроме того, крупные частицы в матрице могут генерировать новые дислокации вследствие различия удельных объемов матрицы и выделившихся частиц. Взаимодействие движущихся дислокаций с полями напряжений, созданными крупными частицами, и является причиной более быстрого упрочнения материала в процессе пластической деформации.

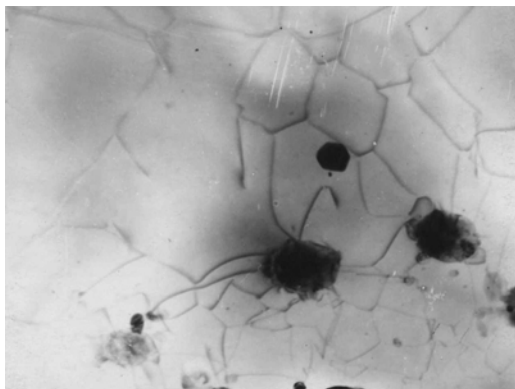


Рис. 6. Субструктура бериллия после старения при 600 °С в течение 4 ч и последующей пластической деформации. Суммарная степень деформации 15%; $\times 10000$

ВЫВОДЫ

Термомеханическая обработка литого дистиллированного бериллия, заключающаяся в чередовании высокотемпературной пластической деформации и отжига, приводит к повышению прочностных характеристик материала на 40% и пластичности в 2 раза. Эффект повышения механических свойств бериллия после термомеханической обработки связан с формированием в металле ячеистой субструктуры и, в отличие от других деформационных видов обработки бериллия, способствует повышению трехмерной пластичности.

Существенное повышение пластичности бериллия после термомеханической обработки, кроме субструктурного измельчения, достигается за счет дополнительного рафинирования матрицы от примесей в результате старения.

Пластическая деформация предварительно термообработанных заготовок бериллия приводит к значительному повышению прочностных и пластических свойств одновременно в трех направлениях.

Повышение механических свойств термообработанного перед деформацией бериллия связано с более сильным и однородным измельчением зерна в объеме образца по сравнению с контрольными образцами.

Наибольший эффект предварительной термической обработки достигается при использовании низкотемпературного старения. Оптимальный размер выделений второй фазы, соответствующий максимальному эффекту термообработки, находится в области 1500...2000 Å. Дальнейшее увеличение размера выделений способствует охрупчиванию материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The Fabrication of Beryllium, v. 1-6 // *NASA Technical Memorandum, NASA-TM, X-53453*, 1966.
2. D.A. Cheer et al. // *Sheet Metal Ind.* 1965, v. 42, p. 595.
3. R.E. Evans et al. *Beryllium Technology*. Gordon and Breach, Science Publishers, inc., N.Y.-L.-P., 1965, p. 569; R.E. Evens, D.A. Cheer. *Conference Internationale sur la Metallurgie du Beryllium*. Press Universitaires de France, Paris, 1965, p. 455.
4. G.A. Alers, Y.C. Lin // *Trans. Met. Soc. AIME*. 1966, v. 236, p. 482.
5. R. Lane // *J. Metals*. 1958, v. 10, p. 738.
6. J.L. Frankeny et al. Rep. TID-22797, 1966 (*Reactor Materials*. 1966-67, v. 9, p. 220).
7. J.M. Logerot. *Conference Internationale sur la Metallurgie du Beryllium*. Press Universitaires de France, Paris, 1965, p. 455.
8. И.И. Папилов, Г.Ф. Тихинский. *Пластическая деформация бериллия*. М.: «Атомиздат», 1973, 304 с.
9. G. Thahn, A.P. Rosenfeld // *Trans. Met. Soc. AIME*. 1967, v. 239, p. 403.
10. F.W. Cooke et al. // *J. Materials*. 1971, №2, p. 403.
11. F.J. Fraikor, A.W. Brewer // *Trans Quarterly*. 1968, №4, p. 784.

12. E. Levine, G. Lutjering // *J. Less-Common Met.* 1971, v. 23, p. 343.

13. P. Bastien, P. Pointy // *J. Nucl. Mater.* 1963, v. 10, p. 63; *Metal.* 1960, v. 8, p. 612.

14. И.А. Тараненко и др. // *ФММ.* 1970, т. 29, с. 619.

15. G.S. Ansell, F.V. Lenel // *Acta Met.* 1960, v. 8, p. 612.

Статья поступила в редакцию 21.03.2013 г.

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ДЕФОРМОВАНОГО БЕРИЛІЮ ВИСОКОЇ ЧИСТОТИ

I.I. Papirov, V.S. Shokurov, A.I. Pikalov, A.A. Nikolaenko

Наведено результати вивчення можливості поліпшення механічних властивостей і пластичності листів з литого дистильованого берилію шляхом використання пластичної деформації і термообробки.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEFORMED HIGH-PURITY Be

I.I. Papirov, V.S. Shokurov, A.I. Pikalov, A.A. Nikolaenko

The purpose of this study is to investigate the possibility of improving the mechanical properties and ductility of cast distilled beryllium sheets using plastic deformation and heat treatment.