

На правах рукописи



Мишин Василий Викторович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ И ТЕПЛОЙ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ, ПОЛУЧЕННОГО
ГИДРИДНЫМ МЕТОДОМ**

Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Колбасников Николай Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Юсупов Владимир Сабитович

кандидат технических наук, доцент
Фармаковский Борис Владимирович

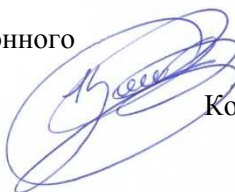
Ведущая организация: ОАО КОНЦЕРН
«ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится « 01 » _____ марта _____ 2012 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, химический корпус, ауд. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « 26 » _____ января _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.03,
доктор технических наук



Кондратьев С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Бериллий обладает уникальной пропускной способностью для рентгеновского излучения – как жесткого, так и мягкого, что, наряду с высокой прочностью, делает его незаменимым в рентгеновском и специальном приборостроении, в качестве окон датчиков и счетчиков излучения, где бериллий используется в виде фольги. Эффективность и точность измерений рентгеновского излучения зависит от толщины используемой фольги и чистоты бериллия. Таким образом, эти свойства фольги – основные показатели качества данного продукта.

Бериллий – химически активный материал и легко взаимодействует с кислородом, поэтому в структуре бериллия всегда присутствуют оксиды. Очень важной характеристикой материала является содержание металлических примесей, для удаления которых используют сложные методы очистки, такие как электролиз солей или дистилляция. И тем не менее, глубокая очистка бериллия от металлических примесей является сложной технической задачей.

В ОАО «ВНИИНМ» им. академика А.А. Бочвара разработан гидридный метод получения высокопористой бериллиевой губки, из которой горячим прессованием получают компактный бериллий с размером зерна 20÷30 нм, чистота которого значительно превосходит лучшие сорта американской фирмы *Brush Wellman* (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Химический состав нанокристаллического бериллия, полученного по гидридной технологии, и высокочистого бериллия *IF-1* фирмы *Brush Wellman*

Нанокристаллический бериллий, полученный по гидридной технологии													
Элементы	Li	Mg	Al	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ti	Ba	Cu	Ni
Содержание, ppm (w)	0,03	2	4	40	2	2	2,5	45	0,1	0,1	0,4	1,5	1,7
Высокочистый бериллий <i>IF-1</i> фирмы <i>Brush Wellman</i>													
Элементы	Zn	Mg	Al	Ca	Mo	Cr	Mn	Fe	Ti	Si	C	Cu	Ni
Содержание, ppm (w)	100	60	100	200	10	35	30	300	10	100	300	50	200

Основная сложность технологии изготовления фольги из бериллия – его хрупкость. Как было установлено ранее, хрупкость бериллия обусловлена несколькими причинами – анизотропией межатомных связей, склонностью к разрушению вдоль плоскостей базиса, особенностями механизма деформации и упрочнения ГПУ металлов с высоким модулем упругости, а также наличием недеформируемых частиц BeO , не смачиваемых основным металлом.

Технологические сложности получения фольги из бериллия, связанные с его хрупкостью, обуславливают чрезвычайно высокие цены на бериллиевую фольгу. Например, стоимость фольги толщиной 8 мкм и чистотой 99,99 % достигает 50000 долларов США за 1 грамм. Таким образом, любое достижение в технологиях пластической деформации может существенным образом изменить соотношение сил на рынке наукоемких технологий и научных исследований, в которых используются рентгеновские методы. Следует отметить, что проблемы обработки и исследований бериллия усугубляются его токсичностью.

Возможно, что эффективным способом борьбы с проблемой хрупкости бериллия является повышение пластичности за счет создания нанокристаллической структуры. Такой структурой обладает новый российский высокочистый бериллий, полученный по гидридной технологии. В структуре этого материала также присутствуют включения BeO (рис. 1, *а*), однако их размер в среднем на порядок ниже, чем у других сортов бериллия, а крупные включения размером более нескольких микрометров (рис. 1, *б*), способные нарушить целостность фольги, отсутствуют.

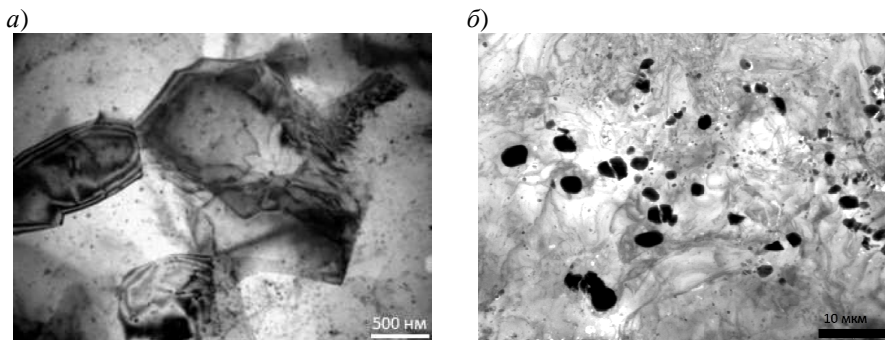


Рис. 1. Размер и характер распределения включений BeO в бериллии, полученном по гидридной технологии (*а*) и в техническом бериллии (*б*); просвечивающий электронный микроскоп

Таким образом, исследование особенностей пластической деформации высокочистого нанокристаллического бериллия, полученного гидридным методом, и разработка технологии прокатки фольги из данного перспективного материала, является **актуальной задачей**.

Целью работы является разработка технологии прокатки фольги из нанокристаллического сверхчистого бериллия, полученного гидридным методом.

Первые опытные прокатки спрессованных заготовок из нанокристаллического бериллия, выполненные в лабораторных условиях, показали, что прокатка при $T=700\div 900$ °С в контейнерах из мягкой стали по режимам, применяемым для бериллия других сортов, сопровождается разрушением. В тоже время дальнейшая холодная прокатка металла, отобранного от неразрушенных участков горячекатаного бериллия, выполненная по технологии, ранее разработанной на кафедре пластической обработки металлов СПбГПУ, показала, что из данного материала может быть получена тонкая фольга. В связи с этим для установления причин разрушения и разработки режимов неразрушающей прокатки заготовки для холодной прокатки фольги необходимо провести дополнительные исследования и решить следующие **задачи**:

- установить причины появления разнотолщинности в исходной заготовке под горячую прокатку, получаемой прессованием высокопористой губки в деформируемой оболочке, и скорректировать режимы прессования;

- определить причины образования газовых пузырей при горячей прокатке в контейнере, а также после отжига – при изготовлении фольги, и устранить их.

- исследовать реологические и релаксационные свойства изначально нанокристаллического бериллия в сравнении с другими сортами данного металла для корректировки режимов горячей прокатки заготовки под холодную прокатку;

- исследовать особенности напряженно-деформированного состояния бериллия при прокатке с помощью методов математического моделирования и с использованием информации, полученной при изучении реологических и релаксационных свойств, для определения рациональной схемы деформации;

• разработать критерий разрушения, отражающий поведение бериллия при прокатке и позволяющий определить условия неразрушающей пластической деформации.

Научная новизна диссертационной работы:

1. При помощи методов математического моделирования в совокупности с экспериментальными данными показано, что осадка высокопористой губки из нанокристаллического бериллия в деформируемой оболочке сопровождается неравномерным течением металла, которое на окончательных этапах деформации формирует бериллиевую заготовку в виде двояковогнутой линзы; горячая прокатка такой заготовки, даже при использовании защитных контейнеров, приводит к разрушению из-за ограниченной пластичности бериллия.
2. При исследовании релаксационных и реологических свойств бериллия установлено, что скорость релаксации напряжений в нанокристаллическом металле при деформации в диапазоне температур $700\div 900$ °С значительно выше, чем в бериллии других сортов и превосходит скорость деформационного упрочнения, что вызвано интенсивным ростом зерна.
3. При помощи усовершенствованной методики выявления структуры показано, что высокая пластичность в диапазоне температур $400\div 500$ °С обусловлена работой дополнительного механизма деформации – двойникование.
4. Разработан новый критерий разрушения, который по результатам расчетов напряженно-деформированного состояния с использованием программы *DEFORM-3D* позволяет определить причины разрушения металла и выбрать условия неразрушающей прокатки.

Практическая значимость результатов работы:

В результате выполненных работ были скорректированы технологические режимы прессования высокопористой губки из нанокристаллического гидридного бериллия, необходимые для получения заготовки, пригодной для последующей прокатки без расслоя и других видов дефектов. Усовершенствована методика структурных исследований, позволяющая выявлять микроструктуру в мелкозернистом бериллии. Из возможных схем изготовления фольги наиболее эффективной является: прессование высокопористой губки → теплая прокатка при $400\div 500$ °С в контейнере с

промежуточными отжигами→холодная прокатка с промежуточными отжигами.

Разработанная технология обеспечивает бериллиевой фольге мелкокристаллическую структуру. Прокатана опытная партия фольги толщиной до 8 мкм для рентгеновского приборостроения, которая позволяет значительно повысить качество измерений.

Полученные результаты легли в основу разработки технологической линии изготовления фольги из высокочистого бериллия в условиях ОАО «ВНИИНМ» им. академика А.А. Бочвара и были использованы при внедрении технологии в опытное производство.

Апробация результатов работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: Международная научно-практическая конференция XXXIX Неделя науки СПбГПУ, 6-11 декабря, СПб, 2010; Международный научно-практический семинар по обработке металлов давлением имени профессора А.Ф. Головина «Модернизация и инновации в металлургии и машиностроении», Москва, 2011; 9-я Международная научно-техническая конференция СММТ'11, 22-24 июня, СПб, 2011; 9-я Международная научно-техническая конференция «Пластическая деформация металлов», 21-23 сентября, Украина, 2011.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, из них 3 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка литературы из 108 наименований. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 146 рисунков и 11 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры «Пластическая обработка металлов» СПбГПУ и лаборатории «Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов» НИИ Материалов и технологий СПбГПУ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность и обоснована цель проведенных исследований, сформулированы задачи, научная новизна и практическое значение диссертационной работы.

В первой главе работы представлен аналитический обзор литературы, в котором освещены основные аспекты пластической деформации бериллия. Рассмотрена проблема хрупкости бериллия и факторы, от которых зависят пластические свойства бериллия. Показано, что пластичность бериллия при температурах теплой деформации (400÷600 °С) может достигать 60÷80 %. Уменьшение размеров зерна бериллия до 5÷6 мкм способствует увеличению пластичности до 10÷15 % при температурах ниже температуры хрупкого перехода $T_x = 100\div150$ °С. Способы деформации, при которых в схеме напряженного состояния имеются значительные сжимающие напряжения (прокатка, прессование, выдавливание), считаются рациональными для деформирования бериллия.

Рассмотрены особенности структуры и свойств высокочистого бериллия, получаемого из высокопористой губки с использованием гидридной технологии в ОАО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Высокопористую бериллиевую губку прессуют в вакууме в металлической оболочке при повышенных температурах и получают практически беспористый бериллий с размером зерна 20÷30 нм (рис. 2).

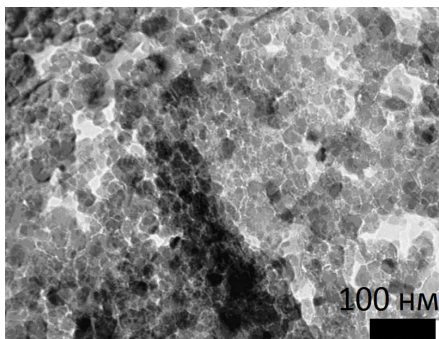


Рис. 2. Микроструктура нанокристаллического бериллия, $\times 100000$

опробовать традиционные режимы горячей и холодной деформации, принятые для порошкового технического и дистиллированного бериллия.

Во второй главе описаны материалы, методики и оборудование, использованные при проведении исследований. Основной объем исследований был выполнен на гидридном бериллии, а в качестве

Поскольку спрессованная заготовка в виде диска из нанокристаллического бериллия получена из высокопористого исходного материала, а свойства нанобериллия практически неизвестны, можно предположить, что для разработки технологий прокатки тонкой вакуумно-плотной фольги потребуются дополнительные исследования. Однако изначально было решено для данного материала

материалов для сравнения использовали дистиллированный бериллий ДГП-56, а также бериллий технической чистоты ТГП-56, полученные методом горячего прессования порошка в вакууме.

Исследование реологических и релаксационных свойств выполняли на комплексе *Gleeble-3800*, предназначенном для имитации процессов термомеханической обработки металлов. Опытную горячую прокатку бериллия в защитном металлическом контейнере выполняли на лабораторном прокатном стане ДУО-210. Холодную прокатку выполняли на стане ДУО-90. Отжиги проводили в вакуумной печи СНВ – 1.3.1/20И1 при разряжении в камере 1×10^{-4} мм рт. ст.

Для изучения структуры бериллия использовали оптические микроскопы "*Leica-DMI5000*" и "*Carl Zeiss*" (*Axio Observer*), оснащенные системой анализа изображений *Thixomet*, и электронный сканирующий микроскоп *TESCAN Mira-3M*. Содержание водорода в бериллии определяли при помощи анализатора водорода «АВ-1», разработанного в ООО «НПК Электронные и Пучковые Технологии» и сертифицированного на территории России.

В третьей главе изложены результаты первых опытных прокаток в контейнере нанокристаллического гидридного бериллия и выполнен анализ причин его преждевременного разрушения. Характер разрушения нанокристаллического бериллия в процессе прокатки представлен на рис. 3.

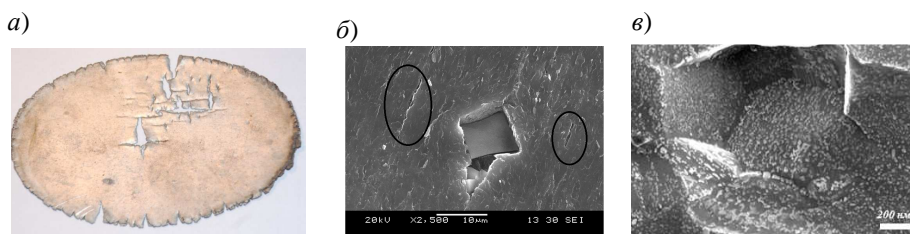


Рис. 3. Разрушение бериллия при первых опытных прокатках в контейнере из мягкой стали (а); слоистость, трещины и неметаллические включения в гидридном бериллии (б); оксиды на поверхности разрушения гидридного бериллия (в)

Установлено, что причинами преждевременного разрушения могут быть:

- неравномерность деформации бериллия, вызванная разнотолщинностью исходной заготовки, полученной прессованием высокопористой губки в деформируемой оболочке;

- неметаллические включения, достигающие размеров, соизмеримых с толщиной прокатываемого бериллия (рис. 3, б);
- несмачиваемые включения, предположительно оксидов или гидрооксидов, расположенные по границам зерен (рис. 3, в);
- накопление деформационного упрочнения из-за отсутствия релаксации напряжений;
- наличие остаточного водорода в бериллии, являющееся следствием гидридной технологии производства.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению процесса прессования (компактирования) высокопористого бериллия в деформируемой оболочке. При помощи программного продукта *MultiDef*, разработанного на кафедре «Пластическая обработка металлов» СПбГПУ, позволяющего использовать модели уплотняемых материалов (пористых и порошковых), а также лицензионного пакета *DEFORM-3D* была построена математическая модель осадки высокопористого бериллия в оболочке. Температура прессования в расчетах принималась равной 700 °С; материал оболочки – упругопластическая среда с упрочнением; пористость бериллия (90%) в исходном состоянии распределена равномерно, начальная плотность составляла 0,1845 г/см³.

Механические свойства высокопористого бериллия были заданы пределами текучести на гидростатическое сжатие p , и на сдвиг τ_s в зависимости от относительной плотности; свойства компактного бериллия были заданы модулем упругости $E=250$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\nu=0,02$ и кривой сопротивления деформации. Во время прессования размер зерна компактируемого материала полагали неизменным, что приводит к инвариантности зависимости $\sigma(\epsilon)$ от величины накопленной деформации. При моделировании прессования скомпактированного бериллия в пакете *DEFORM-3D* использовали модель пластической среды с упрочнением. Результаты решения задачи в программе *MultiDef* представлены на рис. 4.

По мере увеличения степени деформации относительная плотность бериллия растет и выравнивается по объему, достигая на заключительных стадиях прессования значений 0,76÷0,82. Разнотолщинность на этом этапе прессования заготовки отсутствует, что подтверждается экспериментальными данными.

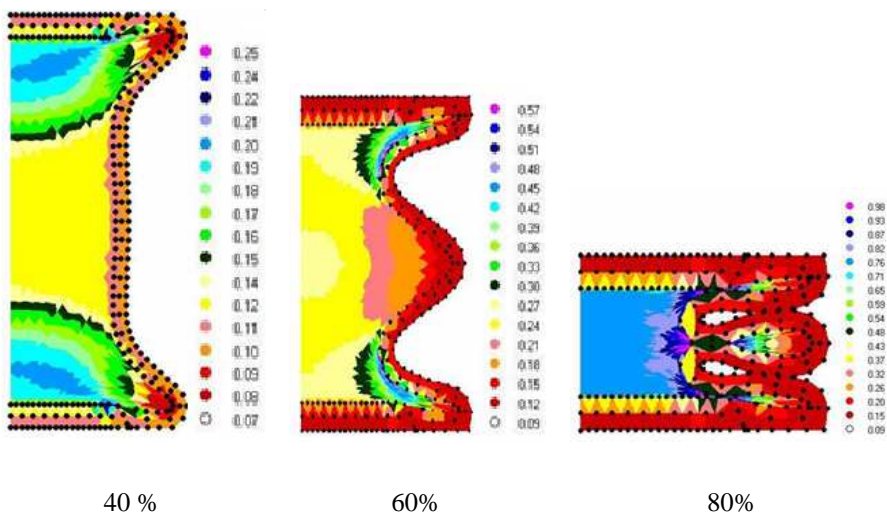


Рис. 4. Распределение плотности прессуемого бериллия в зависимости от степени деформации

После осадки со степенью деформации 90 % относительная плотность бериллия становится равной $0,97 \div 0,99$, что позволяет в дальнейшем считать его компактным. При дальнейшем прессовании в оболочке из стали 20 уже с первых этапов начинает проявляться разнотолщинность бериллия (рис. 5, а). Использование в качестве оболочки металла с более высоким модулем упругости (рис. 5, в), например вольфрама, или металла со значительно более высоким пределом текучести можно исключить разнотолщинность (рис. 6, в). Аналогичное решение получено при решении задачи с использованием конечно-элементного моделирования в программе *DEFORM-3D* (рис. 6). Таким образом, показано, что появление разнотолщинности у заготовки под последующую горячую прокатку обусловлено особенностями течения металла при прессовании в оболочке.

Для устранения расслоя заготовки при последующей прокатке были скорректированы условия прессования для выполнения условий консолидации слоев спрессованной губки в соответствии с выбранным критерием соединения металлов при пластической деформации.

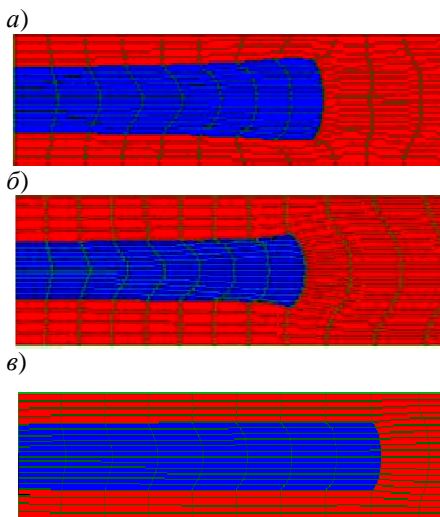


Рис. 5. Формоизменение заготовки бериллия на заключительных этапах прессования в оболочке с различным модулем упругости: *a* – 167 ГПа; *б* – 200; *в* – 400 ГПа; расчет по программе *MultiDef*

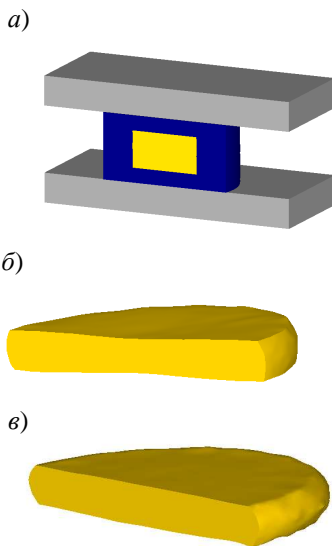


Рис. 6. Формоизменение бериллия при прессовании в оболочке, рассчитанное в программе *DEFORM-3D*, коэффициент трения между штампом и оболочкой $\mu=0,48$: *a* – исходное состояние; *б* – форма заготовки после прессования в оболочке из стали 20; *в* – заготовка после прессования в оболочке с пределом текучести выше, чем у бериллия

В пятой главе изложены результаты исследования реологических и релаксационных свойств различных сортов бериллия на комплексе *Gleeble-3800*. Использовали методику испытаний на двойное нагружение при постоянной температуре с переменными паузами между стадиями деформации. По результатам испытаний строили зависимости истинных напряжений от деформаций, определяли объемную долю релаксированного (рекристаллизованного) металла и исследовали структуру образцов.

Было установлено, что нанокристаллический гидридный бериллий в диапазоне температур $600 \div 900$ °С имеет высокое сопротивление деформации ($\sigma_{0,2}=310$ МПа при $T=800$ °С), что вдвое выше, чем у дистиллированного бериллия. При горячей деформации ($T=700 \div 800$ °С) бериллий, имевший изначально размер зерна $20 \div 30$ нм, приобретает мелкозернистую структуру со средним

размером зерна $5\div 6$ мкм (рис. 7), причем время паузы между деформациями практически не влияет на размер зерна. При отсутствии пластической деформации мелкодисперсные выделения ВеО сдерживают рост зерна.

Установлено, что рост зерна и формирование структуры происходит непосредственно во время деформации, когда напряжения повышают движущие силы миграции границ до значений, обеспечивающих снятие блокады со стороны частиц ВеО. Скорость релаксации напряжений после небольших деформаций превосходит скорость деформационного упрочнения. Механизмом релаксации является миграция границ нанозерен, которая приводит к укрупнению структуры.

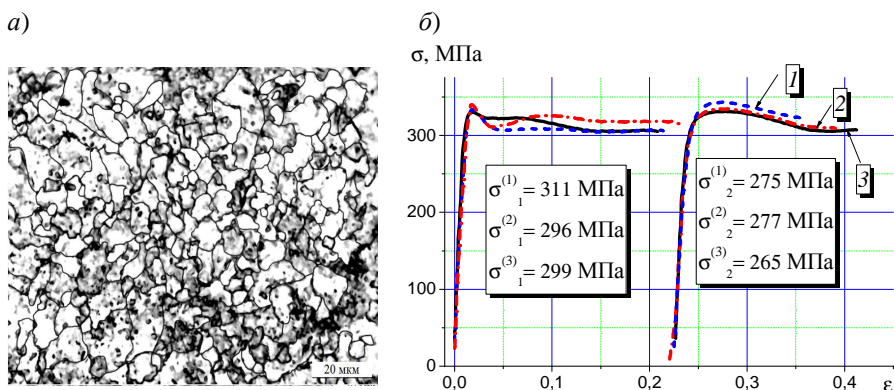


Рис. 7. Структура нанокристаллического бериллия после испытания на двойное нагружение при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, время междеформационной паузы 1800 с (a) и кривые пластического течения при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б) при времени междеформационной паузы: 1 – 10 с ; 2 – 600 с ; 3 – 1800 с

В дистиллированном бериллии термическое разупрочнение происходит заметно медленнее, чем в нанокристаллическом (рис. 8, a) размер зерна после горячей деформации примерно на порядок выше, чем в гидридном: при температуре $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ зерно вырастает до $60\div 70$ мкм.

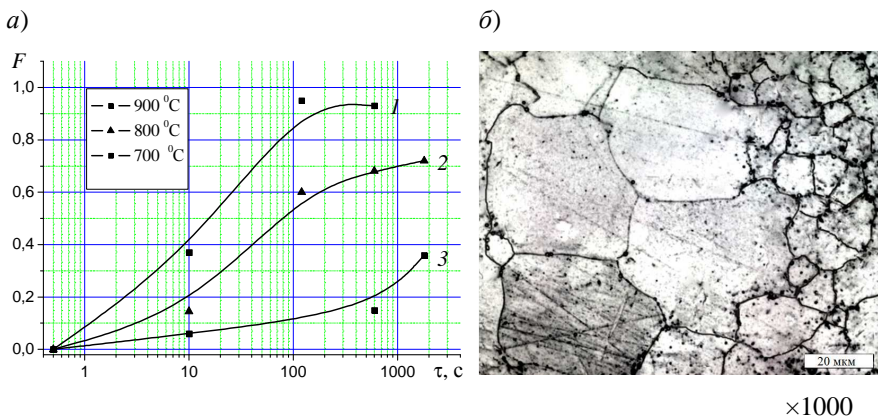


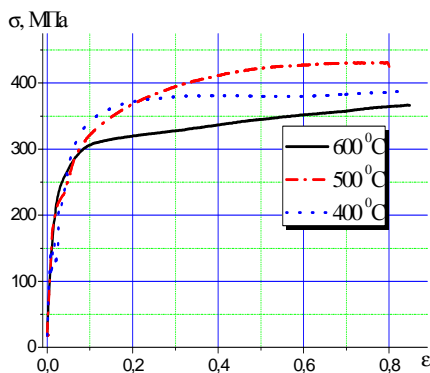
Рис. 8. Зависимость объемной доли релаксированного металла от времени междеформационной паузы и температуры для дистиллированного бериллия (а) и структура дистиллированного бериллия после испытаний при 900 °С (б)

Исследование многократной деформации дистиллированного бериллия сжатием ($\epsilon_i = 20\%$) с междеформационными паузами 600 с показало, что низкая скорость релаксации напряжений при температуре 800 °С приводит к накоплению упрочнения и последующему разрушению при суммарной степени деформации 120 %. При более высокой температуре, например 870 °С, релаксационные процессы происходят значительно быстрее и деформационное упрочнение снимается за время междеформационных пауз. Таким образом, накопление упрочнения при температуре деформации 800 °С и ниже может служить причиной преждевременного разрушения бериллия.

Исследование повышенной пластичности в температурном диапазоне 400÷600 °С, выполненное на дистиллированном бериллии, показало, что после непрерывной деформации сжатием до 80 % со скоростью деформации 4 с^{-1} признаки разрушения на образцах отсутствуют. Сопротивление деформации при $T = 400 \text{ °С}$ меньше, чем при более высоких температурах (рис. 9, а). Изучение структуры деформированного бериллия, выполненное при помощи усовершенствованной методики травления, позволило выявить, что диапазоне температур повышенной пластичности в бериллии действует дополнительный механизм деформации – двойникование (рис. 9, б). Этот механизм в бериллии затухает при выходе из диапазона температур 400÷600 °С. Интересно, что подобный

механизм значительного повышения пластичности обнаружен и используется в новых высокопрочных автомобильных *twip*-сталих.

а)



б)



Рис. 9. Кривые пластического течения дистиллированного бериллия при температурах теплой деформации (а) и структура после деформации при температуре 500 °C, $\epsilon = 80\%$ (б)

Шестая глава диссертации посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния бериллия при горячей и теплой прокатке с использованием методов математического моделирования. Для расчетов использовали лицензионную программу конечно-элементного моделирования *DEFORM-3D*.

Моделировали прокатку на стане ДУО-210. Свойства нанокристаллического бериллия задавали согласно результатам исследований, выполненных на комплексе *Gleeble*. Прокатные валки принимали абсолютно жестким телом. Между бериллием и контейнером задавали условия контакта с коэффициентом трения $\mu=0,3$. Коэффициент трения между валками стана и контейнером принимали равным $\mu=0,4$. Конечно-элементная модель контейнера с образцом бериллия представлены на рис. 10.

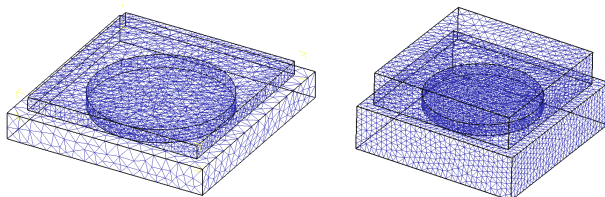


Рис. 10. Конечно-элементные модели контейнеров, используемые при моделировании: контейнер с тонкой стенкой 5 мм и с толстой стенкой 15 мм

Для оценки возможности разрушения бериллия в процессе прокатки был разработан критерий, учитывающий влияние сжимающих напряжений в очаге деформации

$$\sigma = \sigma_p = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2} \geq \frac{\gamma_{s \min}}{2a_{\text{гp}}} + \sigma_1,$$

где σ_p – разрушающие напряжения, σ_2 и σ_3 – главные компоненты растягивающих напряжений; σ_1 – сжимающие напряжения, препятствующие разрушению; $\gamma_{s \min}$ – поверхностная энергия слабого звена; $a_{\text{гp}}$ – среднее расстояние между атомами через границу.

По сути, напряжения $\frac{\gamma_{s \min}}{2a_{\text{гp}}}$ представляют собой барьер разрушения при одноосном растяжении, а $\gamma_{s \min}$ – поверхностная энергия базисной плоскости ($\gamma_{s \min} = 0,232 \text{ Дж/м}^2$). Для комнатной температуры значение допустимых растягивающих напряжений $[\sigma] = 450 \text{ МПа}$; для температуры $400 \text{ }^\circ\text{C}$ $[\sigma] = 275 \text{ МПа}$; для температуры $800 \text{ }^\circ\text{C}$ $[\sigma] = 260 \text{ МПа}$.

На рис. 11 представлены результаты моделирования прокатки нанокристаллического бериллия в контейнере со стенкой 15 мм при температуре $800 \text{ }^\circ\text{C}$ с обжатием 15 % (для удобства восприятия информации на рисунке верхняя крышка контейнера не показана).

Использование критерия разрушения совместно с расчетом напряженно-деформированного состояния позволило исследовать различные варианты прокатки бериллия для различных температур и установить режимы, не приводящие к разрушению нанокристаллического бериллия (табл. 2). Результаты расчетов возможности разрушения бериллия соответствовали полученным экспериментальным данным.

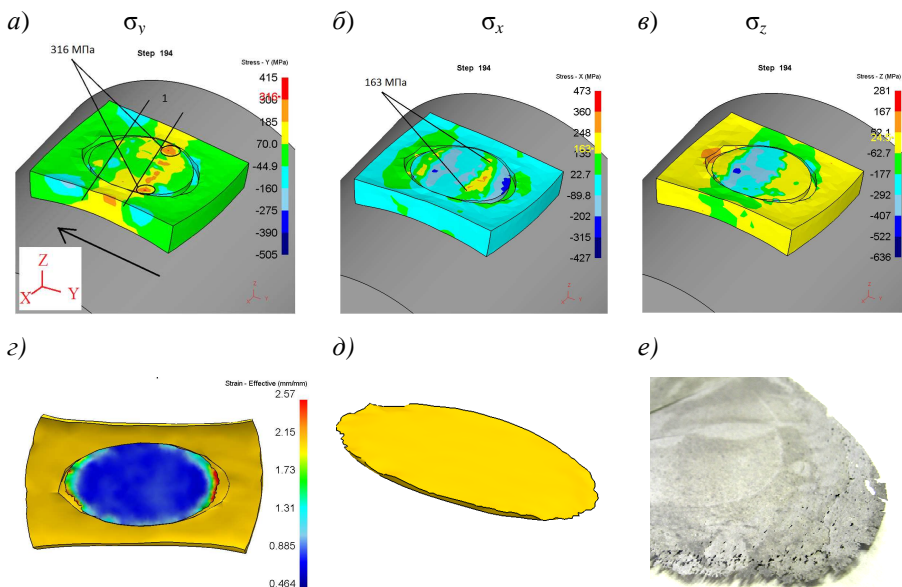


Рис. 11. Распределение напряжений при прокатке бериллия в стальном контейнере со стенкой толщиной 15 мм (а–в), отделение бериллия от стенок контейнера и его локальное утонение при дальнейшей прокатке, вызванное образованием пустот в контейнере (г), конечная форма горячекатаного металла (д) и разрушение концевых участков полосы при прокатке (е)

Т а б л и ц а 2

Рассмотренные варианты прокатки бериллия в контейнере и оценка возможности разрушения

№	Особенности прокатки	Возможность разрушения
1.	Контейнер с тонкой стенкой	Нет
2.	Низкий коэффициент трения	Есть
3.	Контейнер с технологической ступенькой	Есть
4.	Контейнер с толстой стенкой	Есть
5.	Высокопрочный контейнер	Нет
6.	Широкий высокопрочный контейнер	Нет

Расчетами установлено, что прокатка разнотолщинных заготовок нанокристаллического бериллия, полученных прессованием высокопористой губки в деформируемой оболочке, неизбежно сопровождается разрушением металла.

Математическое моделирование теплой прокатки.

Поскольку бериллий при температурах $400 \div 500$ °С имеет повышенную пластичность, то при помощи численного эксперимента с использованием предложенного критерия разрушения была исследована возможность его неразрушающей прокатки без защитных контейнеров при указанных температурах.

Моделировали и прокатывали образцы дистиллированного бериллия размером $5 \times 30 \times (50 \div 100)$ мм. При математическом моделировании решали температурно-деформационную задачу. Коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости, излучения задавали по справочным данным. Коэффициент теплопередачи от полосы к валкам стана задавали равным $50 \frac{\text{Н/с}}{\text{мм/}^\circ\text{С}}$ (слабое

«захолаживание» металла при контакте в валками) и $5000 \frac{\text{Н/с}}{\text{мм/}^\circ\text{С}}$ (сильное «захолаживание»). Поскольку теплая прокатка сопровождается высокими деформирующими напряжениями, прокатные валки принимали упругими с модулем упругости $E = 210$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$.

Во время выполнения опытных прокаток при помощи лазерных пирометров измеряли температуры на входе и выходе металла из очага деформации. При обжатиях 35% на выходе из валков температура поверхности составила приблизительно 160 °С при начальной температуре металла 400 °С. Решение тепловой задачи дает такое же решение при коэффициенте теплопередачи $5000 \frac{\text{Н/с}}{\text{мм/}^\circ\text{С}}$.

рис. 12 представлено решение задачи теплой прокатки при высоком коэффициенте теплопередачи.

Результаты численного моделирования и опытных прокаток показали, что разрушение образцов может быть вызвано несколькими причинами, в том числе:

- «захолаживанием» при контакте с валками и выходом из температурного диапазона повышенной пластичности;
- растягивающими напряжениями σ_y на кромке полосы в очаге деформации;
- растягивающими напряжениями σ_x , действующими при входе и выходе полосы из очага деформации.

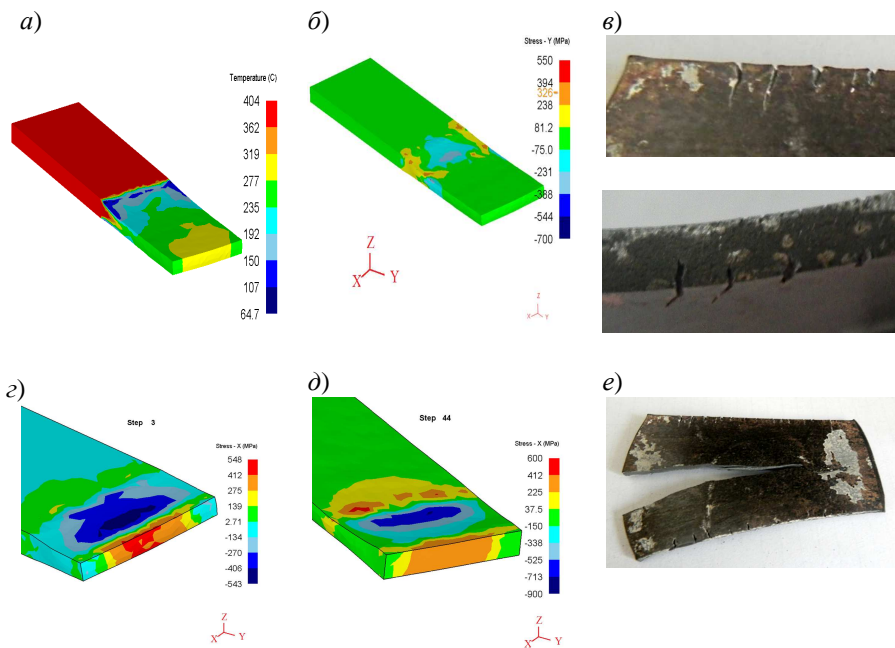


Рис. 12. Распределение температуры металла по объему бериллия при высоком значении коэффициента теплопередачи в валки стана (а); растягивающие напряжения σ_y на кромке полосы, превышающие допустимые значения $[\sigma]$ (б); разрушение бериллия от действия растягивающих напряжений σ_y на кромке образца (в); растягивающие напряжений σ_x на входе полосы в валки (г) и на выходе (д), превышающие допустимые значения $[\sigma]$; разрушение бериллия от действия растягивающих напряжений σ_x (е)

Характерные виды разрушения бериллия показаны на рис. 12. Основным является представленный на рис. 12, е. Ограничить и полностью устранить действие растягивающих напряжений σ_x , приводящих к разрушению бериллия, удастся, если использовать защитный контейнер. В этом случае во время прокатки напряжения σ_x в опасных зонах образца являются сжимающими (рис. 13).

Таким образом, анализ напряженно-деформированного состояния бериллия при прокатке с использованием предложенного критерия разрушения позволил установить, что наиболее целесообразным способом прокатки бериллия и изготовления заготовки под холодную прокатку является теплая прокатка в защитном контейнере при температуре 400÷500 °С. Дальнейшая холодная прокатка такого материала с промежуточными отжигами по

режимам, рекомендованным в предыдущих работах, не вызывает сложностей.

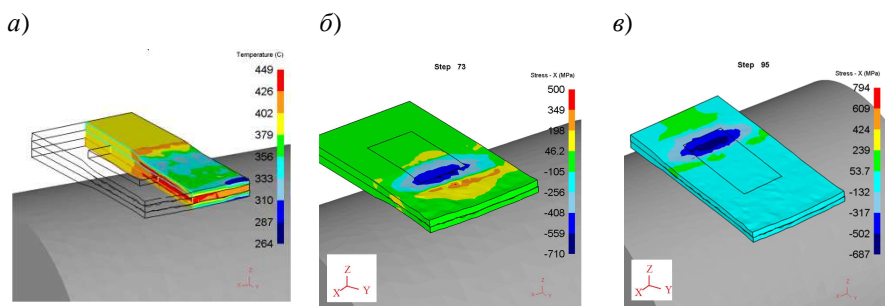


Рис. 13. Распределение температуры (а) и напряжений σ_x при входе (б) и выходе (в) из очага деформации при теплой прокатке бериллия в контейнере

Общие выводы

1. На основании установленных закономерностей компактирования высокопористой наноструктурированной бериллиевой губки в деформируемой оболочке были выбраны технологические режимы получения заготовки нанокристаллического бериллия, пригодной для дальнейшей прокатки.
2. Исследование реологических и релаксационных свойств нанокристаллического бериллия, а также бериллия различных сортов позволило определить неразрушающие режимы горячей и теплой прокатки с учетом регламентированных междеформационных пауз.
3. Показано, что при отсутствии пластической деформации структура нанобериллия стабильна из-за торможения границ высокодисперсными частицами BeO . Этот эффект может быть использован при проведении отжига бериллия после теплой и холодной прокатки для сохранения наноструктурного состояния.
4. Показано, что релаксация напряжений в нанокристаллическом бериллии обусловлена миграцией границ нанозерен, протекает значительно быстрее, чем в других сортах данного металла и приводит к укрупнению зерна до $5 \div 6$ мкм.
5. Установлено, что пластическая деформация бериллия при температурах $400 \div 500$ °С сопровождается подключением дополнительного механизма деформации и релаксации напряжений – двойникование, который является причиной

- повышенной пластичности металла. Высокую пластичность бериллия целесообразно использовать в технологиях прокатки для сохранения ультрамелкозернистой структуры металла.
6. Масштабный численный эксперимент, выполненный с использованием программы конечно-элементного моделирования *DEFORM-3D*, а также последующий анализ условий разрушения металла при помощи предложенного критерия, позволил установить условия неразрушающей прокатки бериллия в горячем и теплом состоянии. Наиболее целесообразной как для сохранения структуры, так и для предотвращения разрушения является теплая прокатка при температурах 400÷500 °С в защитном контейнере.
 7. На основании полученных результатов и результатов ранее выполненных исследований на кафедре пластической обработки металлов СПбГПУ разработана лабораторная технология изготовления фольги из нанокристаллического бериллия толщиной до 8 мкм. Результаты работы использованы ОАО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара для организации опытно-производственного участка по изготовлению тонкой фольги для специального приборостроения из сверхчистого нанокристаллического бериллия, полученного гидридным методом.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Колбасников Н.Г., Наумов А.А., Дураничев В.В., Мишин В.В., Корчагин А.М. Исследование формирования структуры и свойств стали 10Г2ФБ с использованием комплекса Gleeble-3800 // Труды международной научно-технической конференции СММиТ. – 2009. – С. 508-515.
2. **Н. Г. Колбасников, О. Г. Зотов, В. В. Мишин, А. А. Немтинов, А. В. Голованов, С. В. Сосин. Исследование возможностей повышения свойств стали 10Г2ФБ за счет реализации технологии прокатки TRIP-сталей // Черные металлы. – 2009. – №2. – С. 12-16.**
3. Колбасников Н. Г., Зотов О. Г., Дураничев В. В., Наумов А. А., Мишин В. В., Рингинен Д. А. Влияние больших деформаций в горячем состоянии на структуру и свойства низкоуглеродистой стали // Металлообработка. – 2009. – №4(52). – С. 25-31.

4. Мишин В.В., Шишов И.А. Колбасников Н.Г. Математическая модель и лабораторная прокатка фольги из нанокристаллического высокочистого бериллия // *Материалы международной научно-практической конференции XXXIX Неделя науки СПбГПУ. Ч. IV.* – 2010. – С. 73-74.
5. Мишин В.В., Шишов И.А. Колбасников Н.Г. Математическая модель прессования высокопористой металлической губки из сверхчистого нанокристаллического бериллия // *Материалы международной научно-практической конференции XXXIX Неделя науки СПбГПУ. Ч. IV.* – 2010. – С. 76-78.
6. Мишин В.В., Шишов И.А. Получение фольги из нанокристаллического высокочистого бериллия методом горячей прокатки в чехлах // *Сборник докладов международного научно-практического семинара по обработке металлов давлением имени профессора А.Ф. Головина. Модернизация и инновации в металлургии и машиностроении.* – 2011.
7. Н.Г. Колбасников, В.В. Мишин, А.В. Забродин, Ю.Е. Маркушкин. Исследование кинетики релаксации напряжений в нанокристаллическом бериллии // *Труды Международной научно-технической конференции СММТ'11.* – 2011. – С. 200-202.
8. Н.Г. Колбасников, В.В. Мишин, А.В. Забродин, Ю.Е. Маркушкин. Особенности сопротивления деформации и релаксационных свойств нанокристаллического бериллия при температурах горячей прокатки // *Материалы 9-ой Международной научно-технической конференции Пластическая деформация металлов. Украина.* – 2011.
9. **Н.Г. Колбасников, В.В. Мишин, И.А. Шишов, А.В. Забродин, Ю.Е. Маркушкин. Исследование компактирования высокопористой наноструктурной бериллиевой губки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 123. – С. 211-218.**
10. **Н.Г. Колбасников, В.В. Мишин, И.А. Шишов, А.В. Забродин, Ю.Е. Маркушкин. Обоснование выбора критерия, описывающего разрушение малопластичных металлов при холодной прокатке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 123. – С. 242-251.**