

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 5, июнь, 2017.

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала Кочурко Василий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, Заслуженный работник образования Республики Беларусь, ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Заместитель главного редактора журнала Никишова Алла Васильевна, кандидат филологических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор серии

Алифанов Александр Викторович, лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ответственный секретарь серии

Горбач Юлия Евгеньевна, старший преподаватель кафедры экономики и организации производства инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Редактор текстов на английском языке

Пинюта Ирина Вячеславовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры профессиональной иноязычной подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Дубень Игорь Викторович (*ответственный за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»*), кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и организации технического сервиса учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Белый Алексей Владимирович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Центра индукционных технологий Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Девоино Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть» (Минск, Республика Беларусь).

Добышев Анатолий Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Белорусская государ-

ственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ивашко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Калугин Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (Гродно, Республика Беларусь).

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сельскохозяйственных машин учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Ласковнѳ Александр Петрович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, академик-секретарь отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь).

Нерода Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Спиридонов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры деталей машин Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Шелег Валерий Константинович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Адрес редакции:

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by.

Подписные индексы: 00993 — для индивидуальных подписчиков; 009932 — для организаций.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включѳн в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (машиностроение и машиноведение; процессы и машины агроинженерных систем).

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включѳн в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-1/2016.

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательским отделом С. А. Березнюк

Технический редактор А. Ю. Сидоренко

Компьютерная вѳрстка С. М. Глушак

Корректор С. А. Березнюк

Подписано в печать 12.06.2017. Формат 60 × 84 ¹/₈. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,50. Уч.-изд. л. 7,60. Тираж 75 экз. Заказ 1325.

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: открытое акционерное общество «Красная звезда». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073 Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409 Барановичи.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Дечко М. М., Сенчуров Е. В. Факторный анализ процесса магнитно-абразивной обработки по критериям качества обработанной поверхности	10
Алифанов А. В., Богданович И. А., Малеронок В. В. Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства	18
Алифанов А. В., Милюкова А. М., Бурносов Н. В., Толкачева О. А. Повышение прочностных характеристик порошковой титановой бронзы	25
Голубев В. С., Гуринович В. И., Романчук И. А. Лазерная поверхностная обработка материалов и пути повышения ее эффективности	31
Горчанин А. И., Милюкова А. М. Исследование ножей, упрочненных магнитно-импульсной обработкой, для резки сахарной свеклы	37
Грищенко Л. С., Иванова Н. П., Матыс В. Г., Ашуйко В. А. Ингибиторная защита горячеоцинкованной стали в хлоридсодержащих средах	43
Милюкова А. М., Горчанин А. И., Бурносов Н. В., Михлюк А. И. Определение режима магнитно-импульсного упрочнения дисков хлопкоочистительных машин	49
Попок Н. Н., Кузьмич Е. В., Черневич М. В. Сверление комбинированного металлостеклополимерного материала	56
Попок Н. Н., Кунцевич И. П., Хмельницкий Р. С., Анисимов В. С., Гвоздь Г. И. Изменение передних и задних углов лезвия фрезы при обработке сферических поверхностей детали	71
Русан С. И. Нетрадиционный метод силового анализа статически неопределимых систем с жестким объектом	78
Сиваченко Л. А., Сотник Л. Л. Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибро-валкового измельчителя	87

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Клочков А. В., Ковалевский В. Ф. Результаты испытаний пружинно-пальцевых активаторов клавишного соломотряса зерноуборочного комбайна	93
---	----

УДК 621.762.4:621.77

А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, Н. В. Бурносов, О. А. Толкачева

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220104 г. Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 85 52, alifanov_aav@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВОЙ ТИТАНОВОЙ БРОНЗЫ

Установлено, что пластическая деформация спеченных образцов порошковой титановой бронзы Cu-4%Ti повышает их прочностные характеристики (предел текучести и сопротивление) по сравнению с деформированными образцами после закалки.

Ключевые слова: образцы порошковой титановой бронзы; прессование; спекание; закалка; предел текучести; сопротивление пластической деформации.

Рис. 2. Библиогр.: 5 назв.

A. V. Alifanov, A. M. Miliukova, N. V. Burnosov, O. A. Tolkacheva

Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220104 Minsk, Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, alifanov_aav@mail.ru

IMPROVEMENT OF POWDER TITANIUM BRONZE STRENGTH CHARACTERISTICS

It has been established that plastic deformation of sintered samples of powder titanium bronze Cu-4%Ti increases its strength characteristics (yield stress and resistance) as compared to the deformed samples after quenching).

Key words: samples of powdered titanium bronze; pressing; sintering; quenching; yield stress; plastic deformation resistance.

Fig. 2. Ref.: 5 titles.

Введение. Исследование физической природы и структурно-кинетических закономерностей пластической деформации спеченных заготовок является обязательным условием успешного решения важнейшей задачи порошковой металлургии — получения деталей ответственного назначения. К таким деталям следует отнести вкладыш, который должен обладать определенными свойствами: низким коэффициентом трения, стойкостью к изнашиванию, способностью выдерживать высокие удельные давления. Наибольшее применение получили бронзовые вкладыши, которые изготавливают из оловянистой и свинцовой бронз. Цель настоящей работы — исследование влияния вида термической обработки на сопротивление пластической деформации и деформационное упрочнение порошковой бронзы Cu-4,0%Ti, которая представляет интерес из-за своих высоких прочностных свойств, превосходящих также свойства вышеуказанных бронз. Процентное содержание титана выбрано исходя из данных литературных источников, согласно которым следует, что прочностные характеристики титановой бронзы быстро возрастают при изменении содержания Ti от 0 до 4%, а при более высоком содержании остаются практически неизменными.

Методика эксперимента. Сплавы с массовой долей титана 4,0% получали механическим смешиванием порошков меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) и гидрида титана (ТУ 14-1-2159-77), в качестве твердой смазки использовали стеарат цинка 0,7%. Давлением 500 МПа получали

цилиндрические образцы диаметром 10^{-2} м и высотой $1,6 \cdot 10^{-2}$ м для испытаний на сжатие. Спрессованные образцы подвергали дегидрированию и спеканию в вакууме. Одну партию образцов деформировали непосредственно после спекания, вторую — после закаливания в воде от температуры 1175 К. Их гомогенизацию при закалке осуществляли в среде азота. Образцы деформировали на испытательной машине ZD 10/90 в диапазоне скоростей $\dot{\varepsilon}$ от 10^{-3} с^{-1} до $2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты экспериментального исследования влияния вида термообработки на деформационное упрочнение порошковой бронзы Cu-4,0%Ti представлены графически (рисунок 1). Как видно, после спекания кривые деформационного упрочнения состоят из двух участков: линейной зависимости между напряжением и деформацией (упругая область) и параболического упрочнения. В состоянии после закалки появляется дополнительный участок с линейной зависимостью между ε_i и σ_i , на котором коэффициент деформационного упрочнения приблизительно в 30 раз ниже по сравнению с деформацией в упругой области. Для значений $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ стадии линейного упрочнения соответствуют степени деформации ε_i выше 0,6.

Из представленных данных (см. рисунок 1) видно, что после обоих видов термообработки кривые $\varepsilon_i - \sigma_i$ образуют полосы течения, появление которых обуславливается двумя факторами: более высокими значениями пределов текучести при больших значениях скорости деформации и увеличением коэффициентов деформационного упрочнения с возрастанием значений ε (особенно в области небольших пластических деформаций).

Следует отметить, что влияние скорости деформации на напряжение течения после закалки оказывается менее выраженным по сравнению с состоянием после спекания. Так, при степени деформации $\varepsilon_i = 0,5$ разница в значениях σ_i для скоростей $2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и 10^{-3} с^{-1} составляет 700 и 300 МПа после спекания и закалки соответственно.

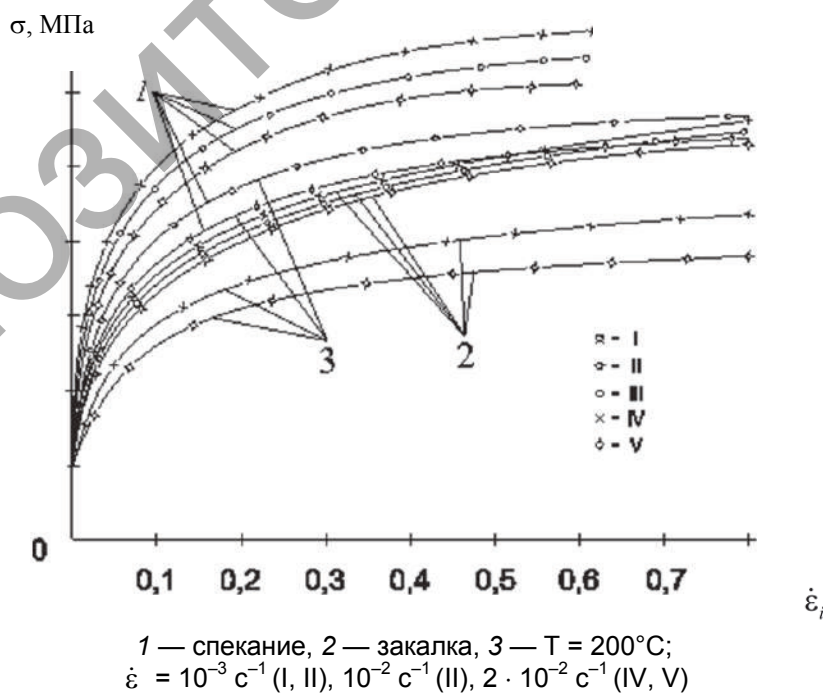


Рисунок 1. — Кривые деформационного упрочнения порошковой бронзы Cu-4,0%Ti

Анализ кривых деформационного упрочнения показал, что закалка порошкового сплава Cu-4,0%Ti приводит к уменьшению как предела текучести, так и коэффициента деформационного упрочнения θ .

Особенно большая разница в значениях θ после закалки и спекания наблюдается при значениях $\varepsilon_i < 0,1$. Так, для скоростей $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ значения $\sigma_{0,2}$ после спекания и закалки составляют 164 и 148 МПа соответственно, т. е. разница величин $\sigma_{0,2}$ равна 16 МПа. При степени деформации $\varepsilon_i = 0,1$ разница в величинах $\sigma_{0,2}$ уже составляет 140 МПа и остается практически неизменной с увеличением значений ε_i .

Из представленных данных (см. рисунок 1) видно, что напряжение течения сплава Cu-4,0%Ti после закалки оказывается более низким даже по сравнению с деформированием образцов при 200°C после спекания. Интересно отметить также, что после спекания деформирование при 200°C приводит не к увеличению напряжения течения с ростом $\dot{\varepsilon}$, как это обычно имеет место, а наоборот, к его уменьшению. Если деформирование бронзы Cu-4,0%Ti осуществляется в состоянии после закалки, то имеет место обычная скоростная чувствительность σ_i .

Зависимость кривых деформационного упрочнения бронзы Cu-4,0%Ti от вида предшествующей термообработки является отражением различного характера субструктуры, образующейся после закалки и спекания. Вывод о решающей роли субструктуры в механическом поведении порошковой бронзы Cu-4,0%Ti подтвердился результатами металлографического анализа. Было установлено, что микроструктура порошковой бронзы Cu-4,0%Ti после обоих видов термообработки напоминает собой структуру феррито-перлитной смеси малоуглеродистой стали; каких-либо заметных отличительных особенностей, способных оказать влияние на характеристики механического поведения, из представленных микрофотографий обнаружить не удается.

Для изучения физической природы процессов, контролирующих скорость пластической деформации порошковой бронзы Cu-4,0%Ti после спекания и закалки, были выполнены исследования термически активированных механизмов пластической деформации.

Не задаваясь характером распределения препятствий в плоскости скольжения дислокации, напряжение пластического течения металлических материалов можно представить в виде суперпозиции двух составляющих:

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_d, \quad (1)$$

где σ_f — термоактивационное напряжение;

σ_d — атермическое или безактивационное сопротивление движению дислокации [2].

Для анализа чувствительности напряжения течения к скорости деформации продифференцируем выражение (1) по $\ln \dot{\varepsilon}$, где $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} = \frac{\partial \sigma_f}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + \frac{\partial \sigma_d}{\partial \ln \dot{\varepsilon}}. \quad (2)$$

Безактивационное сопротивление движению дислокации, обусловленное их взаимодействием, описывается уравнением

$$\sigma_d = \alpha \mu b \sqrt{\rho},$$

где μ — модуль сдвига;

b — вектор Бюргерса дислокации;

ρ — плотность дислокации;

α — константа, учитывающая конфигурацию дислокации [3].

Производную $\frac{\partial \sigma_d}{\partial \ln \dot{\epsilon}}$ находим по правилам дифференцирования сложной функции:

$$\frac{\partial \sigma_d}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\partial \sigma_d}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\sigma_d}{2} \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}}. \quad (3)$$

Взаимосвязь между характеристиками механического поведения компактного и пористого материалов через величину плотности γ описывается уравнениями показательного или экспоненциального видов. В частности, для компонент напряжения течения широко используется уравнение

$$\sigma_{\Pi} = \sigma \gamma^m, \quad (4)$$

где σ_{Π} — напряжение течения порошкового материала;

m — константа [4].

После подстановки уравнений (4) и (3) в (2) и несложных преобразований получаем, пренебрегая зависимостью γ от $\ln \dot{\epsilon}$:

$$\frac{\partial \sigma_d}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \gamma^m \sigma_f \left(\frac{\partial \ln \sigma_d}{\partial \rho} - \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right) + \frac{\sigma_d}{2} \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}}. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что зависимость $\Delta \sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}$ (которую мы в дальнейшем будем называть скоростной функцией) от напряжения течения σ_{Π} должна аппроксимироваться прямой линией, наклон которой, если не принимать во внимание зависимость плотности γ от скорости деформации $\dot{\epsilon}$, равен

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}}. \quad (6)$$

При пластической деформации порошковых материалов могут иметь место три варианта, представляющие интерес. Когда скорость пластической деформации контролируется одним видом препятствий (какими являются дислокации при деформировании чистой порошковой меди), зависимость скоростной функции от напряжения течения должна аппроксимироваться прямой линией, проходящей через начало координат, поскольку активационное напряжение в металлах с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК-решеткой) пренебрежимо мало [3].

Если скорость пластической деформации контролируется одновременно двумя видами препятствий, причем второй вид имеет атермический характер (например, мелкодисперсные выделения, имеющие некогерентную связь с матрицей), то скоростная функция будет пропорциональна разности напряжений: $\frac{\partial \sigma_{\Pi}}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \propto (\sigma - \sigma_0)$, где σ_0 — атермическая компонента напряжения пластического течения.

Из уравнения (5) следует, что график зависимости скоростной функции от напряжения снова аппроксимируется прямой линией, однако прямая уже не проходит через начало координат, а пересекает ось напряжений в точке σ_0 .

Наконец, если при пластическом деформировании дислокации встречают препятствия, в преодолении которых существенную роль играют термические активации, то, как это следует из уравнения (5), прямая будет пересекать ось ординат.

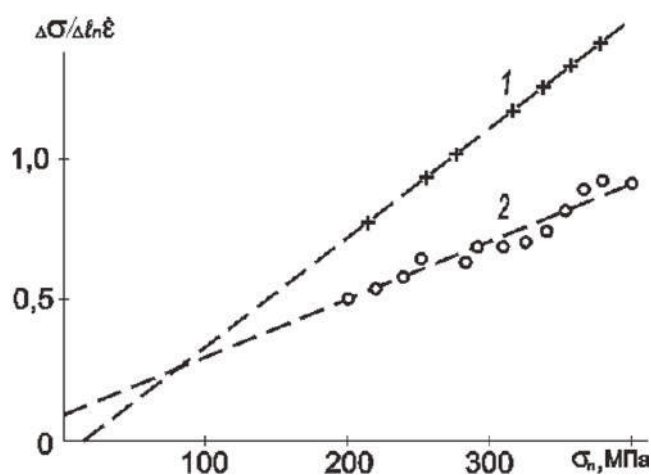
Исследования термически активированных механизмов пластической деформации порошковой бронзы Cu-4,0% Ti в состояниях после спекания и закалки были выполнены путем испытаний на сжатие гладких цилиндрических образцов при скоростях $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. При каждой скорости деформировали по три образца. Результаты экспериментальных данных представлены графически (рисунок 2).

Анализ полученных результатов показывает, что при деформировании порошковой бронзы Cu-4,0%Ti в закаленном состоянии зависимость скоростной функции $\Delta\sigma/\Delta\ln\dot{\epsilon}$ от напряжения σ_n аппроксимируется прямой линией 2, пересекающей ось ординат. Это является отражением факта, что деформационное упрочнение порошковой бронзы Cu-4,0%Ti в данном случае контролируется двумя факторами: твердорастворным и дислокационным, т. е. взаимодействием скользящих дислокаций с атомами Ti и другими дислокациями.

При деформировании порошковой бронзы Cu-4,0%Ti в состоянии после спекания по-прежнему имеет место линейная зависимость между функцией $\Delta\sigma/\Delta\ln\dot{\epsilon}$ и величиной приложенного напряжения. Однако, как это легко видеть из рисунка 2, прямая 1 в данном случае пересекает ось абсцисс в точке $\sigma = 15 \text{ МПа}$. Согласно уравнению (5) это обозначает, что после спекания сплав Cu-4,0%Ti содержит дополнительные источники внутренних напряжений, процесс преодоления которых можно считать атермическим, при этом атермическая компонента напряжения пластического течения равна $\sigma_0 = 15 \text{ МПа}$.

Анализ представленных результатов экспериментальных данных (см. рисунок 2) показывает, что угол наклона прямых $\Delta\sigma/\Delta\ln\dot{\epsilon} - \sigma_n$ в состоянии после спекания больше, чем после закалки. Поскольку плотность образцов после обоих видов термической обработки была практически одинаковой, то, в соответствии с уравнением (6), больший наклон прямых $\Delta\sigma/\Delta\ln\dot{\epsilon} - \sigma_n$ для порошковой бронзы после спекания свидетельствует о большей скорости размножения дислокаций с ростом скорости деформации.

В соответствии с диаграммой состояния Cu—Ti [5] в процессе гомогенизации при 920°C образуется твердый раствор титана в меди, который фиксируется в результате скоростной закалки. Вследствие различий атомных радиусов вокруг атомов титана образуются поля упругих напряжений, которые оказывают силовое воздействие на движение дислокаций в плоскостях скольжения. Короткодействующие силы Ван дер Ваальса от атомов Ti простираются на малые расстояния и преодолеваются при низком уровне напряжений с помощью термических активации. По этой причине наблюдаемый макроскопический процесс



1 — спекание, 2 — закалка

Рисунок 2. — Зависимость скоростной функции $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon}$ от напряжения σ_n

деформации порошковой бронзы Cu-4,0%Ti после закалки является результатом одновременного протекания двух взаимосвязанных процессов: взаимодействие скользящих дислокаций с дислокациями в параллельных плоскостях скольжения и атомами Ti, находящимися в состоянии твердого раствора.

Наличие атермической компоненты напряжения $\sigma_0 = 15$ МПа и больших значений коэффициентов деформационного упрочнения при малых степенях деформации порошковой бронзы Cu-4,0% Ti после спекания свидетельствует об образовании при данном виде термической обработки мелкодисперсных выделений, имеющих некогерентную связь с матрицей. Образование интерметаллидов после спекания является результатом протекания самоотпуска, обусловленного сравнительно медленной скоростью охлаждения ($V_{\text{охл}} \approx 50^\circ\text{C}/\text{мин}$).

Если бы мелкодисперсные частицы имели когерентную связь с матрицей, то при пластической деформации порошковой бронзы Cu-4,0%Ti после спекания имело бы место увеличение предела текучести, связанное с перерезанием дислокациями данных частиц, однако коэффициент деформационного упрочнения и наклон прямых $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon} - \sigma_n$ после обоих видов термической обработки оставались бы неизменными.

Образование после спекания мелкодисперсных частиц с некогерентным характером связи с металлической матрицей сопровождается изменением механизма деформации порошковой бронзы. Дислокации, движущиеся в плоскостях скольжения, преодолевают такого рода препятствия путем выгибания, оставляя вокруг них дислокационные петли. Вследствие этого для второй подвижной дислокации препятствием является не только мелкодисперсная частица, но и поле напряжения от дислокационной петли. Это приводит к росту напряжения течения, коэффициентов деформационного упрочнения и наклона прямых.

Значения пределов текучести порошковой бронзы Cu-4,0%Ti, деформированной сжатием со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} в состояниях после закалки и спекания, составляют 148 и 164 МПа соответственно. Полученная разность значений $\sigma_{0,2}$, равная 16 МПа, с физической точки зрения представляет собой величину дополнительного напряжения, которое необходимо приложить для преодоления образовавшихся после спекания источников внутренних напряжений, и удовлетворительно согласуется с экспериментально определенным значением $\sigma_0 = 15$ МПа (см. рисунок 2).

Заключение. Исследование влияния вида термической обработки на сопротивление пластической деформации спекенных образцов титановой бронзы Cu-4%Ti показало, что после спекания образуются интерметаллические соединения, имеющие некогерентную связь с матрицей, которые приводят к более высокому сопротивлению пластической деформации по сравнению с состоянием после закалки. Проведенные исследования позволяют рекомендовать порошковую титановую бронзу Cu-4%Ti для изготовления вкладышей подшипников скольжения, работающих в условиях высоких нагрузок.

Список цитируемых источников

1. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1986.
2. Судзики, Т. С. Динамика дислокаций и пластичность / Т. Судзики, Х. Есинага, С. Такеути. — М., 1989.
3. Гиндин, И. А. Физика программного упрочнения / И. А. Гиндин, И. М. Неклюдо. — Киев, 1979.
4. Стрелов, К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов. — М., 1985.
5. Saarivitra, V. J. X-ray studies of deformed metals / V. J. Saarivitra, H. S. Cannon // Metal Progress. — 1959. — № 8. — P. 81—84.

Поступила в редакцию 02.03.2017