

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Co

А.В. Корзников, Г.Ф. Корзникова*

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Ст. Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

*e-mail: korznikova@anrb.ru

Аннотация. Исследовано деформационное поведение двух магнитотвердых сплавов 23Х15КТ (Fe-23%Cr-15%Co) и 30Х23К (Fe-30%Cr-23%Co) в интервале температур 800-1050°C и скоростей деформации $10^{-1} - 10^{-4}$ с⁻¹. Установлено влияние двух типов структур – ультрамелкозернистой и пластинчатой ($\alpha+\gamma$ в сплаве 23Х15КТ и $\gamma+\sigma$ в сплаве 30Х23К) на характеристики сверхпластичности сплавов. При растяжении сплава 30Х23К с пластинчатой структурой напряжение течения после 10% деформации плавно снижается, а в сплаве 23Х15К, наоборот, деформация идет с упрочнением. Показано, что исследованные сплавы с ультрамелкозернистой структурой проявляют сверхпластическое поведение при деформации в условиях осадки и растяжения в интервале температур 900-950°C и скоростей деформации $10^{-2} - 10^{-4}$ с⁻¹.

Ключевые слова: сверхпластичность, ультрамелкозернистая структура, магнитотвердые сплавы.

1. Введение

Создание новых и совершенствование существующих узлов и конструкций машин в авиации, ракетной технике, судостроении, приборостроении и других отраслях специального машиностроения, использующих постоянные магниты, связано с повышением требований к их эксплуатационным характеристикам, таким как надежность и долговечность. Это обусловлено, в частности, тем, что увеличение мощности, повышение скоростных и температурных условий работы деталей и узлов современных конструкций, механизмов и машин заставляет их магнитные элементы работать во все более тяжелых условиях – при высоких статических и динамических нагрузках. Поэтому наряду с высокими магнитными характеристиками они должны обладать необходимым комплексом механических свойств: высокой статической и усталостной прочностью, ударной вязкостью, теплостойкостью, износостойкостью и другими характеристиками.

Сплавы системы Fe-Cr-Co относятся к группе деформируемых магнитотвердых сплавов, используемых в широком интервале температур [1]. Существующие технологии получения постоянных магнитов из этих сплавов, в том числе с применением традиционных процессов прессования, прокатки, ковки в сочетании с термической и термомагнитной обработкой в последнее время все меньше справляются с задачами получения заданного высокого уровня механических и эксплуатационных свойств в изделиях ответственного назначения, включая магнитные гирокомпасы. Обработка металлов с применением эффекта сверхпластичности является одним из наиболее передовых, ресурсосберегающих и высокопроизводительных способов производства заготовок деталей, обеспечивающих высокий уровень механических и служебных свойств.

В настоящей работе представлены результаты изучения деформационного поведения двух магнитотвердых сплавов 23Х15КТ и 30Х23К, отличающихся содержанием легирующих элементов в широком интервале температур и скоростей деформации. Установлено влияние двух типов структур – ультрамелкозернистой микродуплексного типа и пластинчатой ($\alpha+\gamma$ в сплаве 23Х15КТ и $\gamma+\sigma$ в сплаве 30Х23К) на характеристики сверхпластичности сплавов.

2. Материалы и методы исследования

Исследуемые сплавы имели следующие составы: 23Х15КТ - Cr-23%; Co-15%1%; Ti – 1%; V-0,4% и 30Х23К - Cr - 30,5 вес%; Co – 23%; Ti – 0,4%; V-0,4%; Si - 0,4%; ост. - Fe. После горячей ковки в интервале температур 1200-1000°C заготовки сплавов закаливали в воде от 1200°C в случае сплава 23Х15КТ и 1350°C в случае сплава 30Х23К.

Испытания на растяжение и осадку проводили на универсальном динамометре «Инстрон» при температурах 800, 850, 900, 950, 1000 и 1050°C при скоростях деформации $10^{-1} - 10^{-4}$ с⁻¹. Образцы для деформации вырезали на электроискровом станке. Толщина плоских образцов на растяжение составляла 2 мм. Для испытаний на сжатие использовали образцы диаметром 10 мм. Коэффициент скоростной чувствительности напряжения течения m определяли методом переключения скоростей.

3. Результаты и их обсуждение

Сплавы системы Fe-Cr-Co в зависимости от химического состава в диапазоне 500 - 1300°C имеют различный фазовый состав [2,3]. В сплавах могут присутствовать: высокотемпературная α -фаза, представляющая ОЦК твердый раствор, γ -фаза с ГЦК решеткой, упорядоченная σ -фаза, существующая как равновесная в высоколегированном сплаве 30Х23К в интервале температур 700-1100°C, а также изоморфные ($\alpha_1+\alpha_2$)-фазы, которые формируются в процессе спинодального распада при термообработке с понижением температуры от 720 до 520°C для формирования высококоэрцитивного магнитного состояния. Для получения заданного фазового состава в этих сплавах перед отжигом в соответствующей фазовой области необходимо провести закалку из области однофазного α - твердого раствора, которая для сплава 23Х15КТ находится выше 1150°C, а для более легированного сплава 30Х23К выше 1300°C.

Формирование структуры в сплаве 23Х15КТ. Для изучения влияния исходной структуры на деформационное поведение в каждом из сплавов были получены два типа двухфазных структур – пластинчатая и ультрамелкозернистая глобулярная, типа микродуплекс.

При нагреве предварительно закаленного на α - твердый раствор сплава 23Х15КТ в интервале температур 750-1250°C, соответствующей на диаграмме состояний области ($\alpha+\gamma$) фаз, в матричных зернах α -фазы выделяется γ -фаза в виде пластинчатых пакетов. В одном зерне α -фазы формируется несколько пластинчатых пакетов, причем в пределах одного пакета все пластины γ -фазы имеют одинаковую ориентировку. Однако такая грубая структура имеет низкую деформационную способность. Как показано в работе [4], использование предварительной холодной деформации позволяет получить более дисперсную пластинчатую структуру. Для получения такой структуры в сплаве 23Х15КТ закаленные на однофазный α -твердый раствор заготовки подвергали прокатке при комнатной температуре и затем отжигали при температуре 900°C в течение 30 минут. В результате такой деформационно-термической обработки в сплаве 23Х15К формируется ($\alpha+\gamma$) пластинчатая структура, состоящая из пластин γ -фазы со средним линейным продольным и поперечным размерами 4,7 и 1,3 мкм

(рис. 1а). Увеличение дисперсности и однородности структуры связано с тем, что к началу α - γ превращения формируется однородная мелкозернистая структура.

Для получения глобулярной (α + γ) структуры в сплаве 23Х15КТ использовали осадку закаленных на однофазный α -твердый раствор заготовок. Структурные изменения при осадке зависят от температуры, скорости и степени деформации. С увеличением скорости деформации от $0,8 \times 10^{-3}$ до $3,5 \times 10^{-1}$ с⁻¹ при температуре 950°C и степени деформации растет доля раздробленной и сфероидизированной γ -фазы, а в α -фазе уменьшается размер зерен. Увеличение степени деформации при фиксированной скорости $0,8 \times 10^{-3}$ с⁻¹ и температуре 950°C приводит вначале к изгибу пластин γ -фазы, появлению локальных сужений (рис. 1б), затем, при степени деформации 50%, локальные сужения смыкаются и превращаются в цепочку вытянутых искривленных зерен γ -фазы (рис. 1в). Увеличение степени деформации до 70% ведет к увеличению количества раздробленных пластин и формированию сфероидизированных зерен γ -фазы (рис. 1г). Именно такая структура была использована в качестве глобулярной в экспериментах на растяжение.

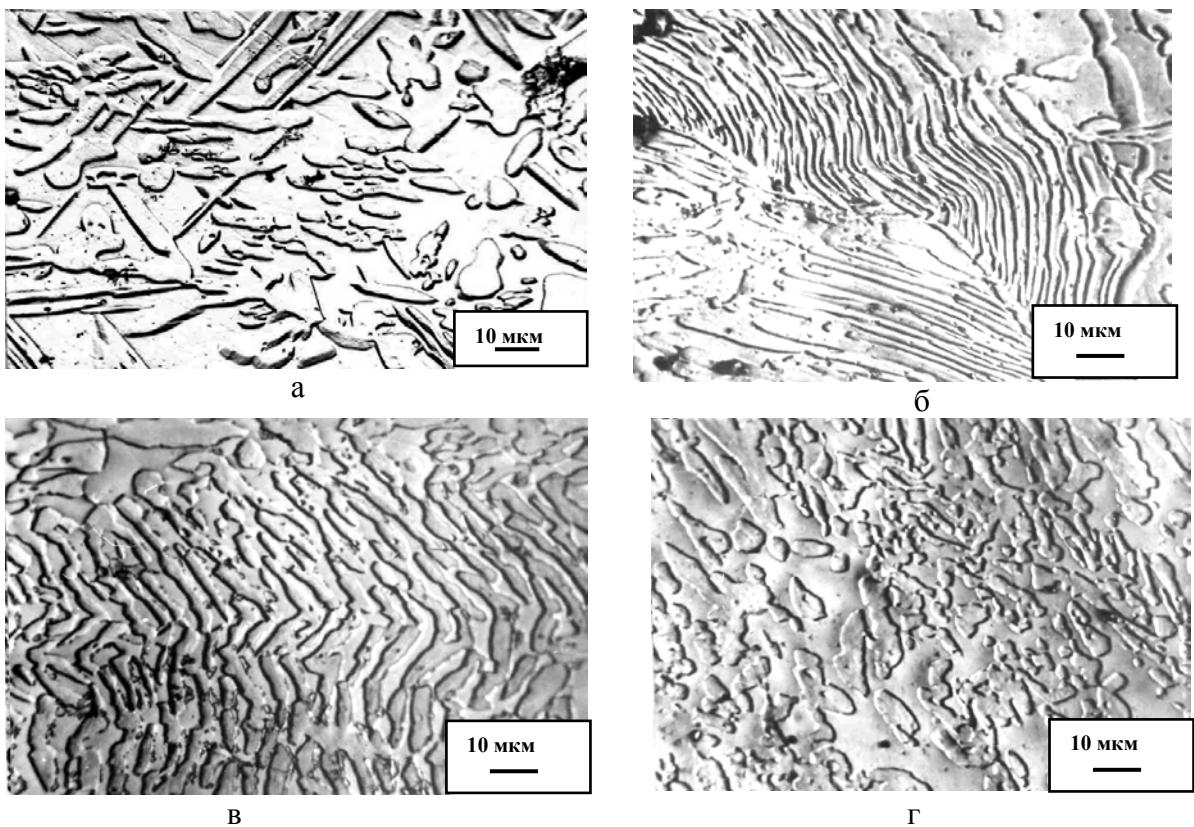


Рис. 1. Микроструктура сплава 23Х15КТ. Образец с пластинчатой структурой, полученный прокаткой при комнатной температуре и отжигом при 900°C (а). Образец после осадки со скоростью $0,8 \times 10^{-3}$ с⁻¹ при температуре 950°C, степень деформации 30% - пластины γ -фазы в α -матрице (б), 50% - частично сфероидизированные пластины γ -фазы (в), 70% - сфероидизированные пластины γ -фазы (г).

Формирование структуры в сплаве 30Х23К. При нагреве сплава 30Х23К с исходной структурой α -твердого раствора в интервале температур 700-950°C, соответствующей области (σ + γ), образуется пластинчатая структура типа квазиэвтектоид. Для экспериментов на растяжение в сплаве 30Х23К двухфазная (σ + γ)

пластиначатая структура, со средним межпластиночным расстоянием 1 мкм, с одинаковой объемной долей γ - и σ -фаз была получена путем часового отжига, предварительно закаленного на α -твердый раствор сплава при температуре 900°C (рис 2а). Видно, что структура представляет собой неравномерное распределение пластиначатых колоний γ и σ -фаз со средним расстоянием между пластинаами 1 мкм.

Отжиг сплава 30Х23К с исходной структурой α -твердого раствора при температурах 800-1000°C после предварительной прокатки при комнатной температуре формирует ультамелкозернистую микродуплексную структуру. Для испытаний на растяжение в сплаве 30Х23К глобулярная ($\sigma+\gamma$) структура с размером зерен обоих фаз около 1 мкм была получена отжигом при 900°C предварительно прокатанных на 80% при комнатной температуре образцов (рис. 2 б).

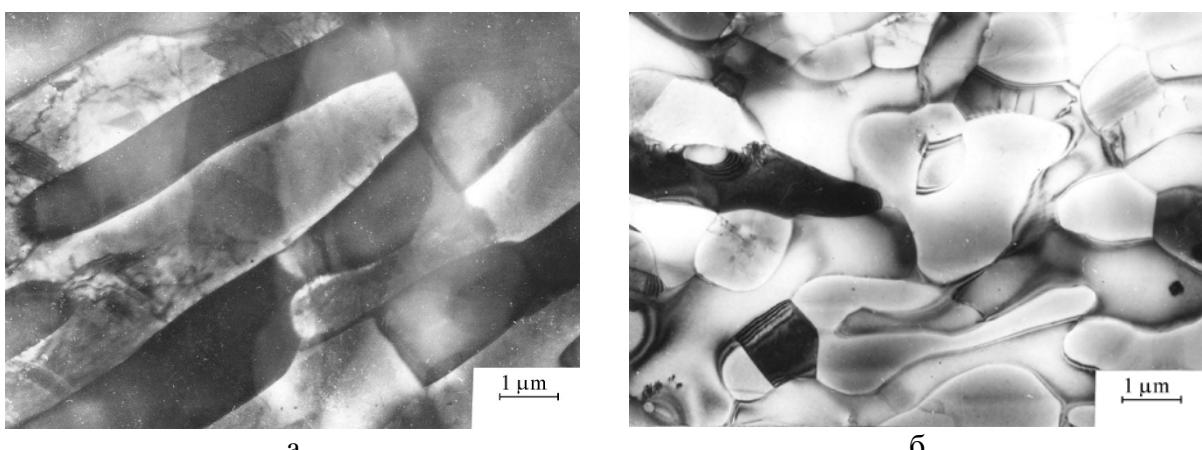


Рис. 2. Микроструктура сплава 30Х23К после отжига при 900 °C. а: образец без деформационной обработки. б: образец, предварительно прокатанный при комнатной температуре.

Необходимо отметить, что при осадке сплава 30Х23К в интервале температур 800-1050°C и скоростей деформации $1,6 \times 10^{-1} - 1,5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ удается так же, как и в сплаве 23Х15КТ, наблюдать типичные признаки постепенной трансформации пластиначатой структуры в зернистую. При этом линейный средний размер зерен σ - и γ -фаз увеличивается с ростом температуры деформации.

Механические свойства сплавов 23Х15КТ и 30Х23К при горячей деформации. Основными признаками сверхпластического течения являются резкое увеличение пластичности, значительное снижение усилий деформации и практическое отсутствие деформационного упрочнения в процессе пластического течения, а также резкая зависимость напряжения течения от скорости деформации. Для выявления признаков сверхпластичности образцы сплавов с пластиначатой и глобулярной структурой были испытаны на растяжение в интервале температур 800-1050°C и скоростей деформации $1,6 \times 10^{-1} - 1,5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Типичные кривые для обоих сплавов приведены на рис 3. Видно, что в сплаве 23Х15КТ с мелким зерном (рис. 3а, кривая 1) после 25% деформации наступает стадия установившегося течения и деформация идет с постоянным снижением напряжения течения, что характерно для сверхпластического течения. В случае пластиначатой структуры резкое упрочнение наблюдается до 20% (рис. 3а, кривая 2), затем интенсивность упрочнения несколько снижается.

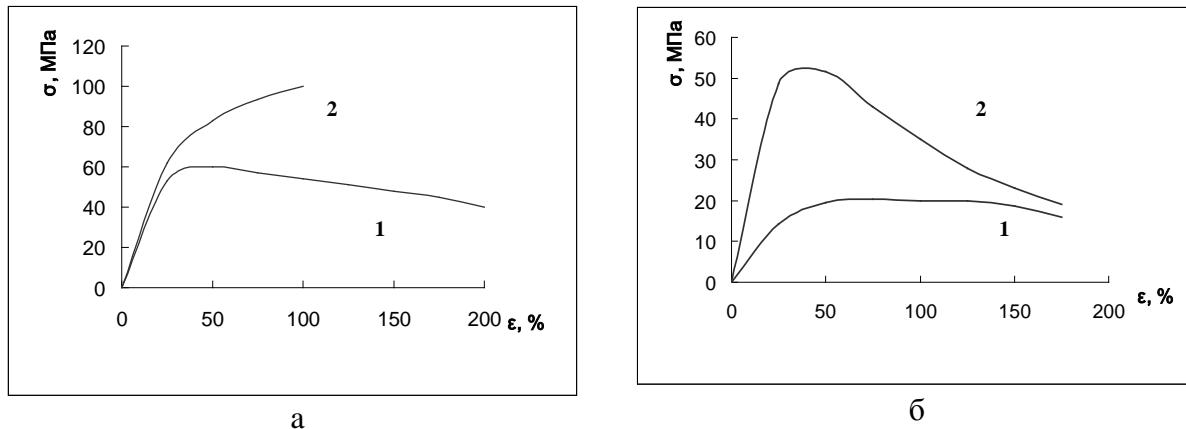


Рис. 3. Кривые «напряжение-деформация» сплавов 23Х15КТ (а) и 30Х23К (б) с ультрамелкозернистой (1) и пластинчатой (2) структурой при растяжении при 900°C и скорости деформации $\dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

В сплаве 30Х23К с мелкозернистой структурой (рис.3б, кривая 1) стадия установившегося течения наблюдается при степени деформации 50%, и в дальнейшем деформация идет без заметного упрочнения, что свидетельствует о сверхпластическом течении. Для образцов с пластинчатой структурой на кривых напряжение-деформация наблюдается резкое упрочнение до степени деформации 10%, после чего следует плавное снижение напряжения течения до уровня, соответствующего образцам сплава с ультрамелкозернистой структурой (рис. 3б, кривая 2). Коэффициент скоростной чувствительности напряжения течения m повышается с 0,21 до 0,47 при увеличении степени деформации с 10 до 120%. Что свидетельствует о том, что деформация приобретает признаки сверхпластического течения.

Анализ структуры образца сплава 30Х23К после деформации показал, что пластинчатая структура полностью трансформировалась ультрамелкозернистую [5]. Ход кривых деформации, подобный демонстрируемому этим сплавом, наблюдали на ряде двухфазных сплавов, имевших близкую исходную пластинчатую структуру и похожие структурные изменения в процессе деформации [6].

Влияние температуры на механические свойства. Данные о влиянии температуры на значения механических свойств сплавов приведены на рис. 4. Видно, что на кривых зависимости относительного удлинения (δ) от температуры испытания сплавов с мелкозернистой структурой имеются максимумы при температуре 900°C для сплава 23Х15КТ (рис. 4а) и 950°C для сплава 30Х23К (рис. 4б). При этом в сплаве 23Х15КТ с пластинчатой структурой относительное удлинение до разрыва плавно возрастает с 45 до 120% при увеличении температуры испытаний от 700 до 1000°C, а в сплаве 30Х23К влияние температуры испытаний на относительное удлинение сплава с пластинчатой структурой не столь значительно, и наблюдается лишь слабо выраженный максимум пластичности при 950°C. Напряжения течения (σ) во всех случаях снижаются с ростом температуры. Следует отметить, что в сплаве 23Х15КТ с мелким зерном в интервале температур 700-800°C напряжение течения выше, чем у сплава с пластинчатой структурой, а в интервале 800-1000 °C различие уменьшается (рис. 4а).

Испытания на сжатие представляют большой интерес в связи с тем, что эта схема деформации ближе к операциям обработки металлов давлением, которые наиболее эффективно могут быть использованы для изготовления постоянных магнитов из сплавов системы Fe-Cr-Co. Поэтому в работе наряду с испытаниями на растяжение были дополнительно проведены испытания на осадку, несмотря на то, что эти испытания не позволяют однозначно оценить величину пластичности сплава, которая является основной характеристикой при изучении сверхпластичности. Вместе с тем,

переключение скоростей при осадке позволяет определить важнейшую характеристику сверхпластичности - коэффициент скоростной чувствительности напряжения течения m .

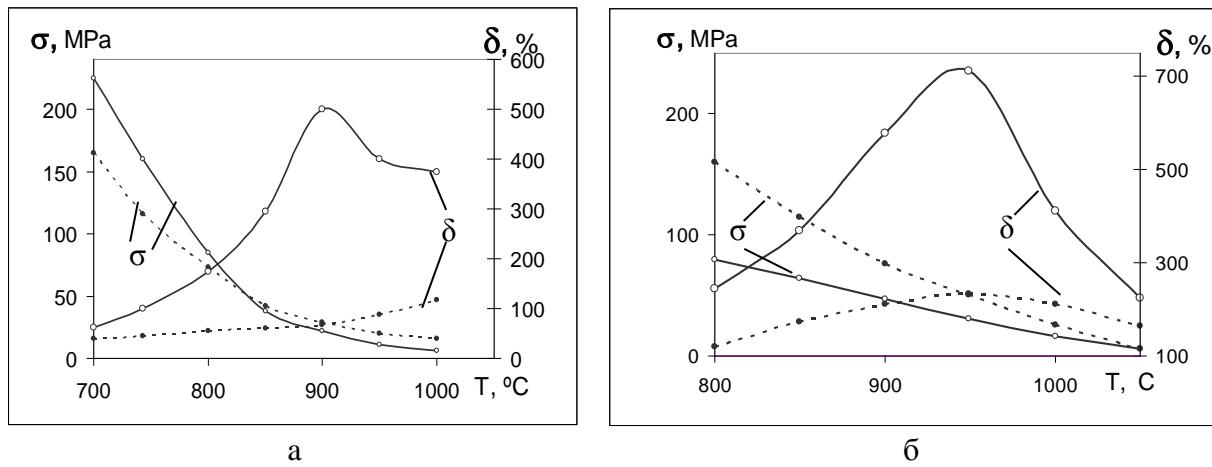


Рис. 4. Влияние температуры на пластичность (δ) и напряжение течения (σ)

сплавов 23Х15КТ (а) и 30Х23К (б) при растяжении со скоростью

деформации $\dot{\epsilon} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Анализ результатов испытаний на осадку сплавов 23Х15КТ и 30Х23К выявил, как и при растяжении, монотонное снижение напряжений течения с увеличением температуры деформации, причем наиболее резкое снижение наблюдается при увеличении температуры с 700 до 900 °C.

Влияние скорости деформации на механические свойства. Другой характерной особенностью сверхпластической деформации является резкая зависимость напряжения течения и удлинения до разрыва от скорости деформации. Существенные различия в свойствах сплавов с мелкозернистой и пластинчатой структурой выявляются и при сравнении скоростной зависимости напряжения течения (рис. 5). В случае ультрамелкозернистой структуры зависимость σ - $\dot{\epsilon}$ имеет характерную сигмоидальную форму с выраженным участком повышенной скоростной чувствительности напряжения течения, соответствующим максимальным значениям относительного удлинения до разрыва δ и коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m как в сплаве 23Х15К (рис. 5а), так и в сплаве 30Х23К (рис. 5б). Максимальное удлинение в сплаве 23Х15КТ с ультрамелкозернистой структурой составляет 640% при $T=900^{\circ}\text{C}$ и $\dot{\epsilon}=1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. При увеличении и уменьшении скорости деформации до $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ относительное удлинение до разрыва уменьшается до 105 и 440% соответственно.

Аналогичная скоростная зависимость для сплава 30Х23К выявила сверхпластическое течение при более высоких температурах и более низких скоростях деформации (рис. 5б). Зависимость относительного удлинения от скорости деформации так же, как и от температуры деформации, носит экстремальный характер лишь для мелкозернистого состояния. Максимальное удлинение, соответствующее температуре 950°С, для состояний с мелкозернистой и пластинчатой структурой при скорости деформации $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ составляет 810 и 180% соответственно. При этом напряжение течения при степени деформации 20% составляет 16 и 57 МПа соответственно.

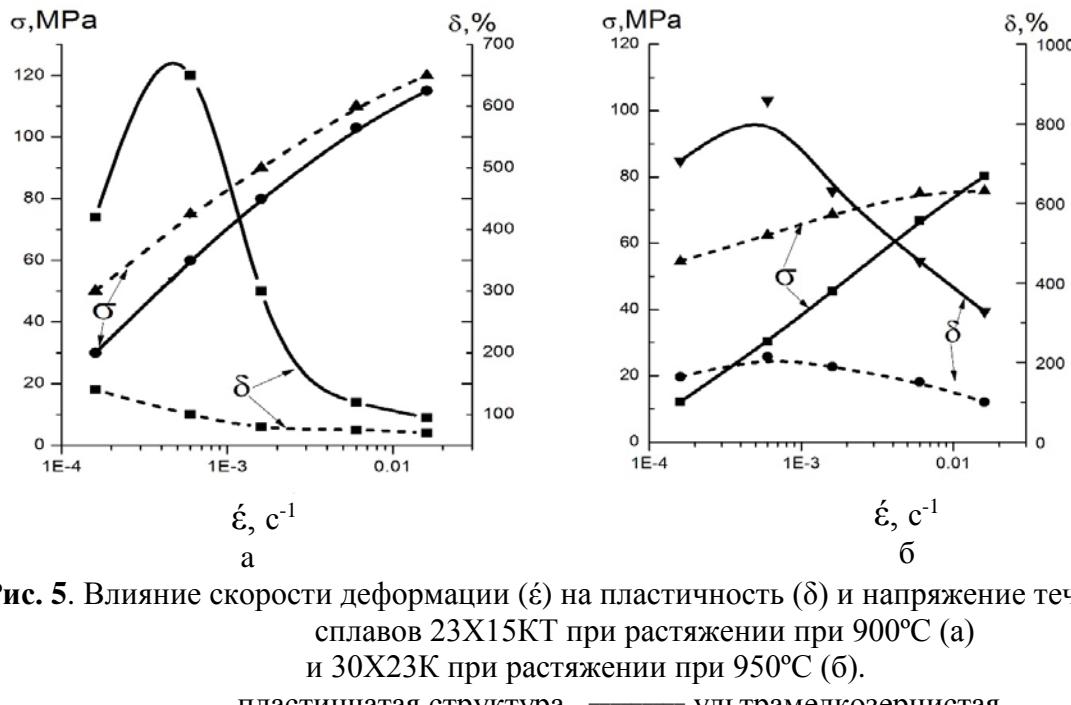


Рис. 5. Влияние скорости деформации ($\dot{\epsilon}$) на пластичность (δ) и напряжение течения (σ) сплавов 23Х15КТ при растяжении при 900°C (а) и 30Х23К при растяжении при 950°C (б).

— пластинчатая структура, — ультрамелкозернистая.

Коэффициент скоростной чувствительности напряжения течения. Измерения коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m в сплаве 23Х15К при температуре максимальной пластичности 900°C показали, что зависимость m от скорости деформации имеет экстремум для мелкозернистого состояния и меняется линейно в сплаве с пластинчатой структурой при степени деформации 50%. Измерение коэффициента m при деформации 20-100% показали, что он изменяется незначительно и составляет 0,43. Для состояния с пластинчатой структурой коэффициент m при деформации 50% составляет 0,12. Анализ коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m при испытаниях на осадку позволил установить, что оптимальная скорость сверхпластической деформации смещается в область более высоких скоростей деформации по сравнению с растяжением, что подтверждается зависимостью m от скорости деформации при растяжении и осадке.

В более легированном сплаве 30Х23К измерения коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m при растяжении при температуре максимальной пластичности 950°C показали, что ее зависимость от скорости деформации имеет экстремальный характер для мелкозернистого состояния. В пределах степени деформации 20-100% коэффициент m меняется незначительно и составляет 0,47, в то время как для пластинчатого состояния значение m возрастает от 0,21 при 20% деформации до 0,42 при 150%. Анализ результатов испытаний на осадку сплава 30Х23К с пластинчатой и глобулярной формой зерен позволяет сделать вывод о том, что сверхпластическое течение в обоих случаях протекает одинаково. Об этом свидетельствует и тот факт, что температурная и скоростная зависимости напряжения течения, а также скоростная зависимость коэффициента m отличаются в обоих случаях в пределах 5% абсолютной величины. Максимальное значение $m = 0,47$ наблюдали при осадке со скоростью $0,8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, что свидетельствует о том, что оптимальный диапазон скоростей при осадке смещается в сторону более высоких скоростей деформации по сравнению с растяжением.

Структурные изменения при сверхпластической деформации. Основным структурным изменением при сверхпластической деформации сплавов 23Х15К и 30Х23К с ультрамелким зерном является некоторый рост зерен α -, γ -, σ -фаз, а в сплавах

с исходной пластинчатой структурой – трансформация пластинчатой структуры в глобулярную. Проведенные ранее микроструктурные исследования в сплаве 30Х23К с исходной пластинчатой $\gamma+\sigma$ структурой показали, что на ранних стадиях деформации в режиме сверхпластичности в пластинах γ - и σ -фаз формируются поперечные субграницы, в местах выхода которых на межфазную поверхность происходит сфероидизация пластин γ - и σ -фаз [7]. С увеличением степени деформации до 100% процесс дробления пластин заканчивается. В микроструктуре наблюдаются только глобулярные зерна γ - и σ -фаз. В менее легированном сплаве 23Х15КТ с пластинчатой структурой в процессе сверхпластической деформации наблюдали аналогичные изменения [4]. Исходная мелкодисперсная пластинчатая структура со средним линейным размером 3,7 и 1,4 мкм трансформировалась после деформации осадкой на 40% при 950°C со скоростью $1,6 \times 10^{-3}$ с⁻¹ в глобулярную полиздрическую со средним размером α - и γ -фаз с размером 2,6 мкм. Увеличение степени деформации до 70% не приводит к росту размера α - и γ -фаз. С увеличением степени деформации до 100% более 40% γ -фазы приобретает глобулярную форму. В целом, все наблюдаемые изменения структуры типичны для сверхпластичных материалов.

4. Выводы

1. Установлено, что сплавы 23Х15К и 30Х23К с ультрамелким зерном проявляют признаки сверхпластичности при растяжении и осадке в интервале температур 900-950°C и скоростей деформации $10^{-2} - 10^{-4}$ с⁻¹, причем при смене напряженно-деформированного состояния от линейного растяжения к деформации осадкой оптимальная область сверхпластичности смещается в сторону больших скоростей деформации.

2. Анализ результатов механических испытаний сплавов 23Х15К и 30Х23К с исходной пластинчатой структурой показал принципиальное различие в механических свойствах сплавов. Так, если в сплаве 23Х15К деформация идет с упрочнением, то в сплаве 30Х23К после резкого упрочнения до степени деформации 10% напряжение течения плавно снижается до уровня сплава с ультрамелкозернистой структурой, и деформация приобретает признаки сверхпластического течения, выраженные в повышении коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m с 0,21 до 0,47 при увеличении степени деформации с 10 до 120%.

3. Анализ структуры после деформации в температурно-скоростном интервале сверхпластичности показал, что в сплаве 23Х15КТ с исходной пластинчатой ($\alpha+\gamma$) структурой происходит частичное дробление и сфероидизация пластин γ -фазы. В то же время в сплаве 30Х23К с пластинчатой ($\sigma+\gamma$) структурой происходит ее полная трансформация в зернистую. Основным структурным изменением при сверхпластической деформации сплавов 23Х15К и 30Х23К с ультрамелким зерном является некоторый рост зерен α -, γ -, σ -фаз.

Исследования проведены на базе центра коллективного пользования ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Литература

- [1] М.А. Либман // *Материаловедение* **9** (2010) 58.
- [2] G.F.Korznikova, N.I.Noskova, A.V.Korneva, A.V. Korznikov // *The Physics of Metals and Metallography* **98(1)** (2004) 107.
- [3] H.Kaneko, M. Homma, N.Nakamura // *IEEE Transactions on Magnetics* **13** (1977) 1325.
- [4] А.В. Корзников, Р.З. Валиев, В.В. Столяров // *Известия ВУЗов Черная металлургия* **11** (1985) 137.

- [5] G.F. Korznikova, Z. Pakiela, A.V. Korznikov, K. J. Kurzydlowski // *Solid State Phenomena* **94** (2003) 63.
- [6] О.А. Кайбышев, Р.Я. Лутфуллин, Г.А. Салищев // *Физика металлов и металловедение* **59** (1986) 578.
- [7] A.V. Korznikov, Z. Pakiela, G.F. Korznikova, K. J. Kurzydlowski // *Solid State Phenomena* **101-102** (2005) 69.

INFLUENCE OF THE STRUCTURE ON THE DEFORMATION ABILITY OF THE Fe-Cr-Co SYSTEM ALLOYS

A.V. Korznikov, G.F. Korznikova*

Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences, Ufa

*e-mail: korznikova@anrb.ru

Abstract. The deformation behavior of two hard magnetic alloys 23X15KT (Fe-23% Cr-15% Co) and 30X23K (Fe-30% Cr-23% Co) have been studied in the temperature range 800-1050 °C and strain rates 10^{-1} - 10^{-4} s⁻¹. The influence of two types of structures - ultrafine-grained and lamellar ($\alpha+\gamma$ in the 23X15KT alloy and $\gamma+\sigma$ in the alloy 30X23K) on the superplasticity characteristics of alloys was established. During tensile straining of the 30X23K alloy with a lamellar structure, the flow stress after 10% deformation is gradually decreased, while in the alloy 23X15K, on the contrary, the deformation proceeds with hardening. It is shown that the investigated alloys with an ultrafine-grained structure exhibit superplastic behavior both under tensile straining and upsetting deformation in the temperature range of 900-950°C and deformation rates of 10^{-2} - 10^{-4} s⁻¹.

Keywords: superplasticity, ultrafine-grained structure, hard magnetic alloys.

References

- [1] M.A. Libman // *Materialovedeniye [Materials Science]* **9** (2010) 58. (in Russian).
- [2] G.F. Korznikova, N.I. Noskova, A.V. Korneva, A.V. Korznikov // *The Physics of Metals and Metallography* **98(1)** (2004) 107.
- [3] H. Kaneko, M. Homma, N. Nakamura // *IEEE Transactions on Magnetics* **13** (1977) 1325.
- [4] A.V. Korznikov, R.Z. Valiev, V.V. Stolyarov // *Izvestiya VUZov Chernaya metallurgiya [Universities news. Ferrous Metallurgy]* **11** (1985) 137. (in Russian).
- [5] G.F. Korznikova, Z. Pakiela, A.V. Korznikov, K. J. Kurzydlowski // *Solid State Phenomena* **94** (2003) 63.
- [6] О.А. Кайбышев, Р.Я. Лутфуллин, Г.А. Салищев // *Физика металлов и металловедение* **59** (1986) 578. (in Russian).
- [7] A.V. Korznikov, Z. Pakiela, G.F. Korznikova, K.J. Kurzydlowski // *Solid State Phenomena* **101-102** (2005) 69.