

ние дислокаций также термически активируемый процесс, связанный с образованием стержней на расщеплённых дислокациях (степень расщепления зависит от энергии дефектов упаковки и величины  $\sigma$ , действующих на дислокациях). В этой же области темп-р препятствия скольжению дислокаций могут преодолеваться путём поперечного скольжения. Переход расщеплённых дислокаций с одной плоскости на другую в результате поперечного скольжения также требует термич. активации процесса стяжки дефекта упаковки расщеплённых дислокаций. В изложенных случаях зависимость  $\epsilon_{уст}$  от  $\sigma$  и  $T$  описывается выражением (8), в к-ром актив. объём и предэкспоненц. множитель зависят от конкретного атомного механизма возврата. При  $T > 0,5 T_{пл}$  скорость П. м. зависит от диффузионных процессов возврата. Если последний осуществляется путём переползания дислокаций от мест, где они застопорены (поля напряжений др. дислокаций и их образований, границы зёрен и пр.), то  $\epsilon_{уст}$  описывается выражением

$$\epsilon_{уст} \approx 100 \left[ \frac{v^* b^2}{k^2 T^2 E^2 M} \right]^{1/2} \exp\left(\frac{\Delta S}{k}\right) \sigma^{4,5} \exp\left(\frac{\Delta H}{kT}\right). \quad (10)$$

Здесь  $v$  — частота колебаний атомов,  $b$  — вектор Бюргера дислокаций,  $M$  — число источников дислокаций,  $\Delta H$  — энергия активации ползучести для металлов, к-рая совпадает с энергией активации самодиффузии.

Известны также дислокац. модели, в к-рых процессом, ограничивающим скорость ползучести, является диффузия точечных дефектов от порогов на винтовых дислокациях. Они приводят к зависимости  $\epsilon_{уст}$  от  $T$  и  $\sigma$  в виде (8).

При предплавленных темп-рах и напряжениях  $\sigma/E < 10^{-6}$  наблюдают т. н. диффузионную П. м.  $\epsilon_{диф}$ , к-рая описывается выражением вида (9) при  $n = 1$ . Такая П. м. осуществляется без участия дислокаций и связана с направленным диффузионным переносом атомов в поле градиента приложенных напряжений, что приводит к изменению формы материала. В частности, при одноосном напряжении поликристаллич. материала возникает градиент концентрации вакансий между продольными и поперечными границами зёрен. Поток вакансий отвечает равный по величине и обратный по направлению поток атомов (рис. 2). Эти потоки

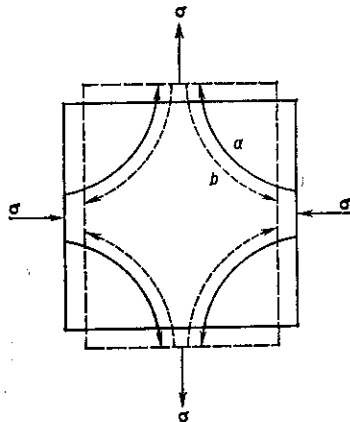


Рис. 2. Схематическое изображение потока атомов к поперечным границам (сплошные стрелки) и встречного потока вакансий к продольным границам (пунктирные стрелки) в зёрне, к которому приложены напряжения.

приводят к удлинению зерна в продольном направлении и сокращению в поперечном. Изменение формы зёрен сопровождается самосогласованным диффузионно-вязким течением по границам зёрен, что обеспечивает сохранение сплошности материала.

Диффузионная П. м. (т. н. Херринга — Набарро — Лифшица ползучесть) имеет пост. скорость и вызывает малую деформацию. Переползание неск. дислокаций в объёме зерна приводит к более высокой скорости тече-

ния, чем чисто диффузионный механизм П. м. Скорость диффузионной П. м. зависит от темп-ры и напряжений

$$\epsilon_{диф} = \frac{32b^2 D \sigma}{\pi d^2 k T} = \frac{32b^2 \sigma}{\pi d^2 k T} \exp\left(\frac{Q_{дд}}{kT}\right). \quad (11)$$

Здесь  $b$  — межатомное расстояние,  $d$  — линейный размер элементов структуры (в частности, зёрен),  $D$  и  $Q_{дд}$  — коэф. и энергия активации объёмной самодиффузии. Если процесс диффузии осуществляется гл. обр. по границам зёрен и зёрна мелкие, а темп-ры ниже предплавленных, но более  $0,5 T$ , то диффузионная П. м., наз. ползучестью Кобла, определяется диффузией по границам зёрен:

$$\epsilon = \frac{150V\sigma}{d^2 k T} \omega D_{гр}, \quad (12)$$

где  $V$  — атомный объём,  $\omega$  — эфф. ширина границы, по к-рой идёт диффузия. Диффузионная П. м. — осн. механизм, к-рым осуществляется спекание дисперсных порошков. Этот вид П. м. является аккомодационным механизмом снижения локальных концентраций напряжений, возникающих при ползучести.

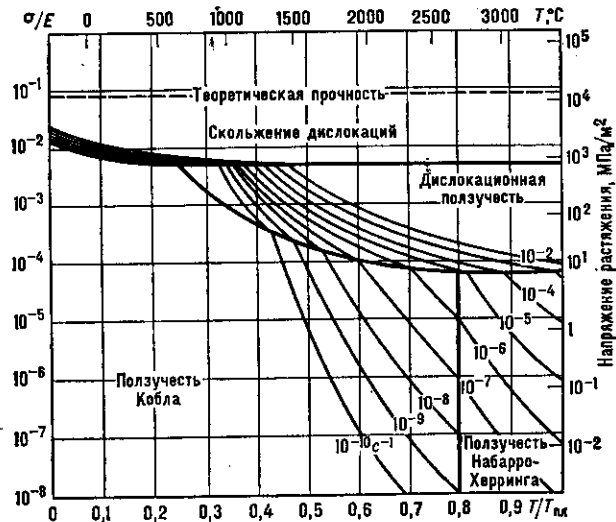


Рис. 3. Карта механизмов деформации при ползучести вольфрама (средняя величина зёрен 10 мкм).

Разнообразие механизмов деформации и зависимость их вклада в общую деформацию от величины  $T$  и  $\sigma$  для конкретных материалов наглядно иллюстрируются т. н. картами механизмов деформации (рис. 3), на к-рых проводят кривые, отвечающие пост. скорости ползучести, к-рые определяют экспериментальным или расчётным путём.

Ускоренная ползучесть и разрушение. П. м. на стадии III часто может занимать половину и более общего времени ползучести от нагружения и до разрушения. На ней накапливается значительная (иногда и большая) часть деформации. На стадии III, когда идёт ускоренный процесс П. м., кинетика деформации не описывается единой зависимостью. На нач. этапах, когда скорость  $\epsilon_{III}$  превышает на 10—20%  $\epsilon_{уст}$ , деформация

$$\epsilon'_{III} = \epsilon_{уст} t + K t^{3/2}; \quad (13)$$

при больших скоростях  $\epsilon_{уст}$  величина деформации становится равной:

$$\epsilon''_{III} = \epsilon'_{III} + N \exp Mt. \quad (14)$$

Здесь  $K$ ,  $N$  и  $M$  — постоянные, к-рые зависят от материала и увеличиваются при повышении  $T$  и  $\sigma$ .