

УДК 669.35.539.214

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭВОЛЮЦИЮ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ Ni

© 2019 г. А. Н. Соловьёв¹, С. В. Старенченко^{1, *}, Ю. В. Соловьёва¹, В. А. Старенченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

*E-mail: sve-starenchenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.

После доработки 16.12.2018 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

В работе приведены результаты исследования кривых деформации и дислокационной структуры монокристаллов Ni с осью сжатия [100] при температурах 293 и 673 К. Показано, что при обеих температурах возникает последовательность дислокационных субструктур: ячеистая, полосовая, фрагментированная. Повышение температуры не изменяет типы субструктур, реализующихся при деформации монокристаллов Ni, однако их параметры существенно различаются.

DOI: 10.1134/S0367676519060292

ВВЕДЕНИЕ

Исследование деформационных процессов, происходящих в чистых металлах, позволяет определить особенности деформирования, выявить и выделить детали изменения дислокационной структуры, что является информационной базой для математического описания деформационных процессов. В работе [1] изучено влияние деформации на состояние монокристаллов Ni с осью сжатия [100] при комнатной температуре. Полученные результаты исследования дислокационной структуры и ее деталей на разных стадиях деформации [2, 3], показали, что так же, как и в работе [4], обнаружена многостадийность процессов, осуществляющихся в деформируемом материале. Монокристалл Ni при комнатной температуре деформируется сложным образом, проявляя разные стадии и дислокационные структуры. Изменение температуры приводит к изменению деформационных процессов в материалах. Поэтому целью данной работы ставилось исследование кривой деформации монокристаллов Ni с осью сжатия [100], изучение дислокационной структуры на разных стадиях деформации при повышенных температурах ($T = 673$ К), сопоставление результатов деформирования при разных температурах и выяснение особенностей температурного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Монокристаллы никеля выращены методом Бриджмена из никеля марки Н-0. Из монокристаллических слитков электроискровой резкой были вырезаны образцы размером $6 \times 6 \times 12$ мм с

осью деформации [100]. Образцы деформировали при температурах $T = 293$ и 673 К на испытательной машине типа “Инстрон” сжатием со скоростью $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, при этом проводилась компьютерная запись кривой деформации. Для изучения дислокационной структуры на просвечивающем электронном микроскопе ЭМВ-100АК из деформированных монокристаллов Ni изготовлены тонкие фольги. Стадии на кривой деформации выделялись по методике, описанной в работе [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные при температуре 673 К исследования процессов деформации монокристаллов Ni обнаружили в дислокационной субструктуре три характерные составляющие. Это: 1) неразоориентированная ячеистая структура, сопровождающаяся формированием ячеистой структуры с разориентациями между группами ячеек; 2) периодические полосовые структуры; 3) фрагментированные структуры с непрерывными и дискретными разориентациями.

Перечисленные составляющие появлялись также при деформации при комнатной температуре (рис. 1). Таким образом, изменение температуры в пределах области от комнатной до 673 К не приводит к появлению качественно новых субструктур (рис. 1). Основные различия проявляются в том, что происходит изменение параметров дислокационных субструктур, их доли и величин степени деформации, при которых они появляются.

Наблюдаемые кривые деформации монокристаллов Ni с осью сжатия [100], полученные деформированием как при температуре 673 К, так и при

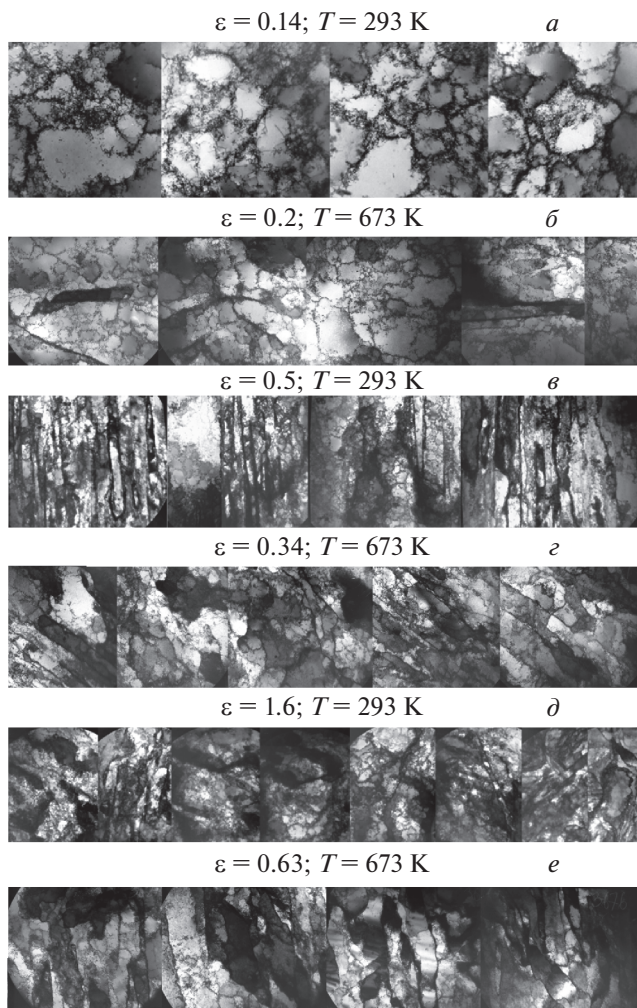


Рис. 1. Виды дислокационных субструктур: *a, б* – ячеистая дислокационная субструктура; *в, г* – полосовая дислокационная субструктура; *д, е* – фрагментированная дислокационная субструктура. Монокристалл Ni ориентация [100].

комнатной, измеренные доли сформировавшихся в процессе деформации субструктур в зависимости от величины деформации показаны на рис. 2.

Дислокационные структуры, наблюдаемые на разных стадиях деформации сопоставлены с кривыми деформации монокристаллов Ni с осью сжатия [100], полученными деформированием при температурах 673 и 293 К (рис. 2*a*). Обнаружено, что с начала пластической деформации при обеих температурах формируется ячеистая субструктура. Уже на стадии линейного упрочнения ячеистая структура отчетливо сформирована и полностью заполняет объем деформируемого кристалла (рис. 2*б* – кривая 1; 2*в* – кривая 1). Эта структура характерна и для стадии III деформационного упрочнения. При переходе к стадии IV происходит формирование полосовой субструктуры. При этом наблюдается исчезновение стенок предшествующей ячеистой структуры.

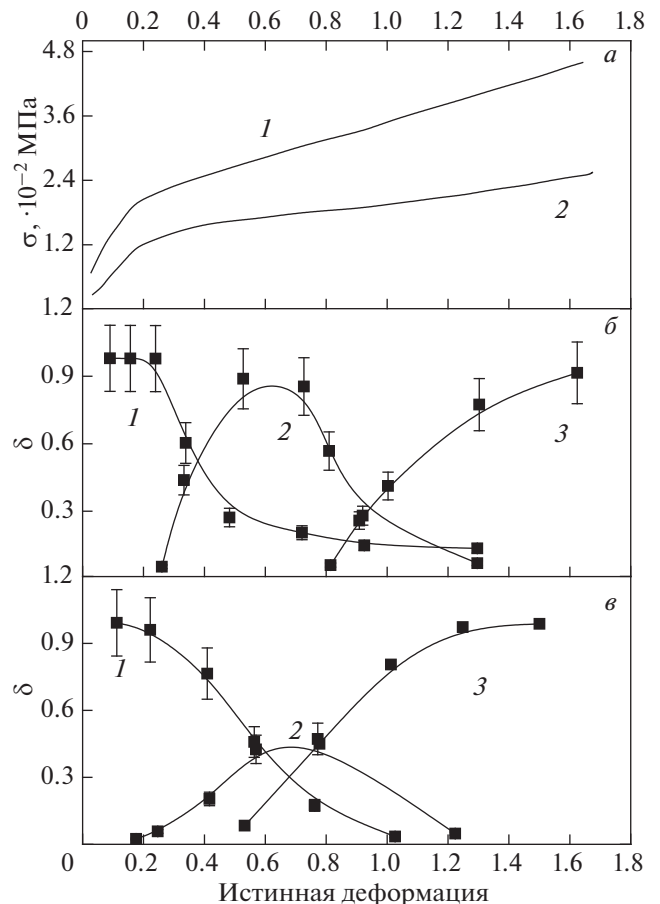


Рис. 2. *a* – Кривые деформационного упрочнения: 1 – $T = 293$ К, 2 – $T = 673$ К; *б, в* – дислокационные субструктуры (доли субструктур: 1 – доля ячеистой субструктуры, 2 – доля полосовой субструктуры, 3 – доля фрагментированной субструктуры в зависимости от степени деформации при $T = 293$ К (*б*), $T = 673$ К (*в*)).

Повышение температуры приводит к тому, что зарождение полосовой структуры начинается при более низких степенях деформации и плотностях дислокаций. Так, при $T = 673$ К уже при деформации $\varepsilon = 0.15$ и плотности дислокаций $\rho = 0.6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ возникает полосовая структура, в то время как при $T = 293$ К она появляется при деформации $\varepsilon = 0.23$ и плотности дислокаций $\rho = 1.4 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ (рис. 2*б* – кривая 2; 2*в* – кривая 2).

Дальнейшее развитие деформации приводит к возрастанию доли полосовых структур. Однако, если при комнатной температуре при деформации $\varepsilon = 0.5–0.7$ полосовые структуры являются основным элементом, и их объемная доля достигает 0.8–0.9, то при температуре $T = 673$ К их доля не превышает 0.5. Протяженность интервала деформаций, в котором наблюдаются полосовые структуры, мало зависит от температуры, при

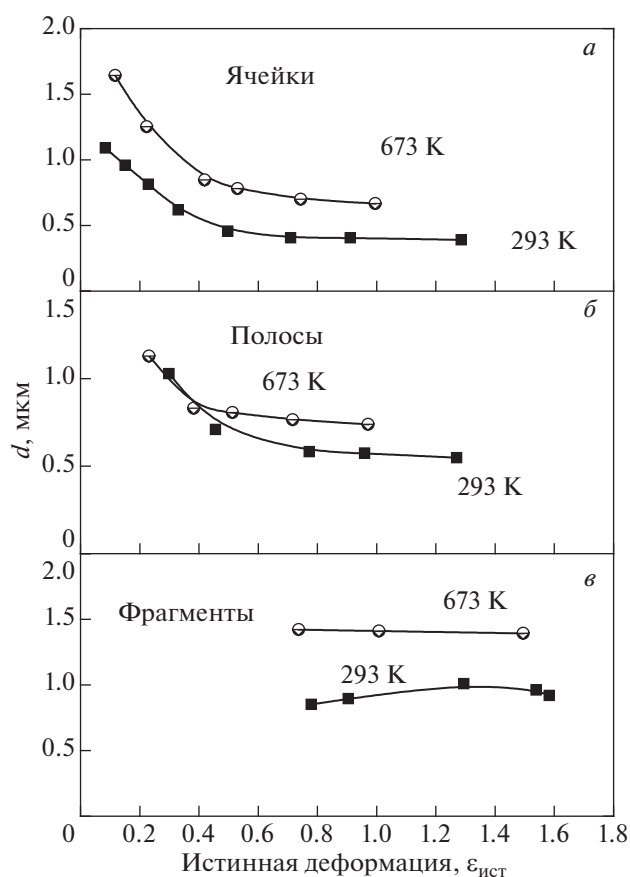


Рис. 3. Зависимости параметров дислокационных структур от степени деформации: *a* – ячеистой (средний размер ячеек); *b* – полосовой (средняя ширина полос); *c* – фрагментированной (средний размер фрагментов) 1 – при $T = 293$ К и 2 – при $T = 673$ К.

комнатной температуре и $T = 673$ К она составляет около $\Delta \varepsilon = 1.0$.

Последующее увеличение степени деформации приводит к постепенному возрастанию доли фрагментированной структуры (рис. 2*b* – кривая 3; 2*c* – кривая 3), которая при $T = 673$ К появляется уже при деформации $\varepsilon = 0.5$, в то время как при $T = 293$ К возникает только при деформации $\varepsilon = 0.8$. Полное заполнение объема кристалла фрагментированными структурами достигается при $\varepsilon \geq 1.3$ ($T = 673$ К) и $\varepsilon \geq 1.6$ ($T = 293$ К).

Переход от одной к другой субструктуре сопровождается изменениями характеристик внутри каждой дислокационной субструктуры в процессе деформирования. Сопоставим изменение параметров наблюдаемых субструктур с возрастанием степени деформации при обеих температурах и изучим влияние температуры на эти изменения. Параметры дислокационных субструктур, такие как средние размеры областей ячеек, полос, фрагментов, их величины приведены на рис. 3.

С увеличением степени деформации при обеих температурах происходит монотонное умень-

шение среднего размера ячеек. Наиболее интенсивное изменение размера ячеек наблюдается до деформаций $\varepsilon \approx 0.5$. При дальнейшем деформировании их изменение незначительно. Подобное поведение зависимости размеров ячеек от степени деформации наблюдается и при $T = 673$ К (рис. 3*a*). Однако повышение температуры приводит к увеличению размеров ячеек.

Возникающая к концу III стадии деформационного упрочнения полосовая структура имеет исходный размер полос, приблизительно равный 1.0 мкм. С увеличением степени деформации ширина полос уменьшается, проявляя тенденцию к достижению стабильных значений (рис. 3*b*). При обеих температурах деформирования возникающие полосы имеют одинаковые размеры, но при развитии процесса при повышенных температурах их размеры уменьшились в меньшей степени.

Что касается фрагментированной структуры, возникающей при $\varepsilon \geq 0.7$, то ее средние размеры возрастают от величин 0.75 мкм с момента возникновения до ~ 1.0 мкм при комнатной температуре (рис. 3*c*). При $T = 673$ К возникшая после $\varepsilon \geq 0.5$ фрагментированная структура имеет средние размеры ~ 1.5 мкм, не изменяющие свою величину при увеличении степени деформации.

Сопоставление процессов и наблюдаемых особенностей деформации при обеих температурах показало, что при повышенных температурах закономерности подобны тем, которые наблюдаются в материале, деформированном при комнатной температуре. Прежде всего, типы дислокационных субструктур и их последовательность одинаковы. Однако стадии деформации, разные типы субструктур при увеличении температуры возникают при меньших степенях деформации. Средние размеры элементов дислокационных субструктур характеризуются тем, что повышение температуры деформации приводит к увеличению размеров ячеек, полос и фрагментов.

Исследование выполнено частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-03-00182-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев А.Н., Старенченко В.А., Старенченко С.В., Соловьева Ю.В. Материалы II Всеросс. науч. конф. молодых ученых с междунар. участием (ПМТС-2015). Томск: Изд-во Том. гос. арх.-строит. ун-та, 2015. С. 27.
2. Соловьев А.Н., Старенченко С.В., Соловьева Ю.В. Материалы II Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых. Томск: Изд-во Том. гос. арх.-строит. ун-та, 2015. С. 1121.
3. Соловьев А.Н., Старенченко С.В., Соловьева Ю.В. // Изв. вузов. Физ. 2017. Т. 60. № 4. С. 73.
4. Конева Н.А., Козлов Э.В. // Изв. вузов. Физика. 1990. № 2. С. 89.
5. Старенченко В.А., Лычагин Д.В. // Физ. мезомех. 2000. Т. 3. № 2. С. 47.