

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, РАЗМЕРА ЗЕРЕН И ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВОЙНИКОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ Э2412\*

*Федоров В.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической  
и экспериментальной физики (feodorov@tsu.tmb.ru)*

*Кириллов А.М., к.ф.-м.н., научный сотрудник кафедры теоретической  
и экспериментальной физики (kirillov@tsu.tmb.ru)*

*Плужникова Т.Н., к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической  
и экспериментальной физики (plushnik@mail.ru)*

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина  
(392000, Россия, Тамбов, ул. Интернациональная, 33)

**Аннотация.** Рассмотрены особенности деформации мелкозернистой стали Э2412 с содержанием кремния 3,63 % и различным набором размеров зерен, деформирующихся преимущественно двойникованием. Образцы подвергали растяжению на машине Instron-5565 со скоростями относительной деформации  $\dot{\epsilon} \approx 0,002 \div 0,660 \text{ с}^{-1}$  при температурах 183 – 393 К. Исследовали образцы двух типов: около 80 % зерен имели размеры в пределах 1,5 – 9,0 и 0,025 – 0,225 мкм. Установлена связь между числом двойников, видом образующейся при нагружении ступени на диаграммах деформации и скоростью деформирования (для зерен  $d_{\text{ср1}} = 3,55 \text{ мкм}$ ). При малых скоростях нагружения за счет высокой скорости роста двойников образование ступеней на диаграммах деформации сопровождается заметным снижением нагрузки. По мере увеличения скорости нагружения величина сброса нагрузки уменьшается, величина  $\Delta\sigma$  изменяет знак при скорости деформирования  $\dot{\epsilon} \approx 0,04 \text{ с}^{-1}$ . В мелкокристаллической стали ( $d_{\text{ср2}} = 0,12 \text{ мкм}$ ) не наблюдается видимых скачков нагрузки при возникновении двойников. В мелкокристаллическом материале мало время роста двойников в зерне, за счет высокой скорости их развития мало и их количество. Построены гистограммы распределения сдвойникованных зерен в зависимости от размера зерен при различных температурах и скоростях нагружения. Выявлено, что максимум распределения сдвойникованных зерен по размеру смещается в сторону более крупного зерна относительно общего распределения зерен поликристалла по размерам. Определено, что существует некоторый оптимальный размер зерен, предпочтительный для развития двойникования, который, как правило, больше среднестатистического размера зерен, определенного в исходном распределении зерен по размерам. Показано, что число двойников в отдельном зерне зависит от температуры испытания и скорости деформирования. Интенсивность двойникования в максимально сдвойникованном образце зависит от температуры и скорости деформирования. Существует температура деформирования, при которой число двойников в зерне постоянно при скоростях деформирования, используемых в работе.

**Ключевые слова:** электротехническая сталь, двойникование, ОЦК решетка, диаграмма напряжение – деформация, размер зерна, температура, скорость деформации, поликристалл.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-469-473

При деформации различных материалов с ОЦК решеткой в определенных условиях в качестве основного механизма выступает механическое двойникование [1 – 6]. Изучение механизмов двойникования при различных термических обработках вызывает значительный интерес [7 – 11], так как двойникование приводит к существенному изменению физико-механических свойств.

Процессу механического двойникования в поликристаллах уделено значительно меньше внимания [12, 13], чем в монокристаллических материалах [14, 15]. Повышенный интерес в последнее время к поликристаллическим материалам связан с изменением их свойств при уменьшении размера зерен до микро- и нанокристаллического [16, 17]. Сложность исследования образующихся двойников заключается в высоких скоростях

роста [18], а также в создании условий их получения (высокие скорости деформации и низкие температуры).

Среди сплавов с ОЦК решеткой, деформируемой двойникованием, особый интерес представляют электротехнические стали с высоким содержанием кремния. Деформационное двойникование этих сталей наблюдается в широком интервале температур.

Цель настоящей работы – исследование процессов деформации электротехнической стали с различным набором зерен в зависимости от температуры и скорости деформирования.

В качестве исследуемого материала использовали электротехническую сталь Э2412 с содержанием кремния 3,63 %, широко применяемую при производстве трансформаторов, генераторов, реле и т.д. Образцы, вырезанные в форме двойной лопатки, с размером рабочей зоны  $40 \times 9,5 \times 0,35 \text{ мм}$  готовили как металлографический

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-41-03166р\_центр\_а).

шлиф. Образцы подвергали растяжению на машине Instron-5565 со скоростями относительной деформации  $\dot{\epsilon} \approx 0,002 \div 0,660 \text{ с}^{-1}$  при температурах 183 – 393 К. В эксперименте исследовали образцы двух типов, в которых около 80 % зерен имели размеры в пределах 1,5 – 9,0 и 0,025 – 0,225 мм. Среднестатистические размеры зерен  $d_{cp1} = 3,55 \text{ мм}$  и  $d_{cp2} = 0,12 \text{ мм}$  соответственно. После деформации образцов осуществляли подсчет двойников в рабочей области, для чего образцы химически травили в 4 %-ом спиртовом растворе азотной кислоты и определяли количество двойников в зернах различного размера.

В ходе испытания на растяжение образцов первого типа ( $d_{cp1} = 3,55 \text{ мм}$ ) на диаграммах нагрузка – деформация при разных скоростях и температурах испытаний отмечалось наличие ступеней (рис. 1, а, б) в области упругопластического перехода.

Появление ступеней на диаграмме  $\sigma(\epsilon)$  связано с образованием деформационных двойников. Характерная ширина ступеньки на диаграмме нагружения не превышает величины деформации приблизительно 0,5 %. Сопоставляли число образовавшихся двойников с величиной относительной деформации в ступени. Связь между числом двойников и величиной относительной деформации представлена экспериментальными точками (рис. 2, а).

В.Ф. Моисеевым и В.И. Трефиловым [19] был предложен метод расчета пластичности при двойниковании поликристаллов, основанный на дислокационной модели двойника в ОЦК решетке. Согласно этой модели  $\epsilon = \frac{\delta N}{2\sqrt{2}Dm}$  (где  $N$  – число двойников толщиной  $\delta$ ;  $D$  – размер зерен;  $m$  – усредненный фактор ориентации). При значениях  $\delta \approx 4 \text{ мкм}$  и  $D = d_{cp1} = 3,55 \text{ мм}$ , взятых из эксперимента, и  $m_{ОЦК} \approx 2$  [20], расчетные данные относительной деформации (прямая линия на рис. 2, а) согласуются с экспериментальными.

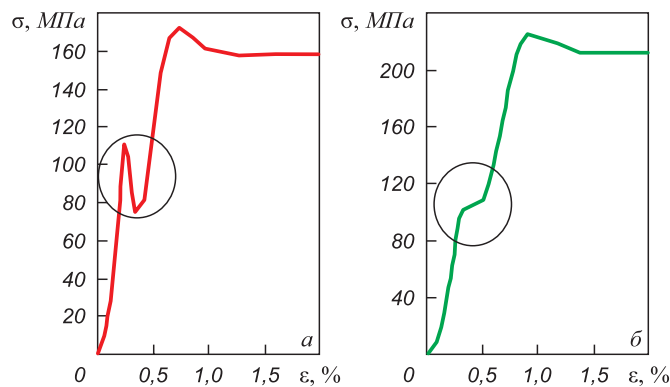


Рис. 1. Характерные диаграммы нагружения электротехнической стали ( $d_{cp1} = 3,55 \text{ мм}$ ) с образованием двойников при температуре  $T = 293 \text{ К}$  и скоростях нагружения  $\dot{\epsilon} = 0,03 \text{ с}^{-1}$  (а) и  $\dot{\epsilon} = 0,06 \text{ с}^{-1}$  (б) (выделена область образования двойников)

Fig. 1. Typical loading diagrams of electrical steel ( $d_{av1} = 3.55 \text{ mm}$ ) with the formation of twins at a temperature of  $T = 293 \text{ K}$  and loading rates  $\dot{\epsilon} = 0.03 \text{ s}^{-1}$  (a) and  $\dot{\epsilon} = 0.06 \text{ s}^{-1}$  (b) (twins formation zone is emphasized)

Отмечено, что форма ступени на диаграммах нагружения зависит от скорости деформирования. При малых скоростях нагружения за счет высокой скорости роста двойников образование ступеней сопровождается заметным снижением нагрузки (рис. 1, а). По мере увеличения скорости нагружения величина сброса нагрузки уменьшается. При скорости выше примерно  $0,04 \text{ с}^{-1}$  снижения нагрузки нет (область II на рис. 2, б). На рис. 2, б представлена зависимость величины и знака скачка напряжения на зависимости  $\sigma(\epsilon)$  при различных скоростях деформирования. При  $\dot{\epsilon} \approx 0,04 \text{ с}^{-1}$  скорость роста нагрузки и скорость сброса ее за счет двойникования совпадают. При этом на диаграмме  $\sigma(\epsilon)$  должна наблюдаться горизонтальная ступень.

Отличительной чертой мелкокристаллической стали ( $d_{cp2} = 0,12 \text{ мм}$ ) от более крупнозеренной ( $d_{cp1} = 3,55 \text{ мм}$ ) является отсутствие видимых скачков нагрузки при возникновении двойников. В мелкокристаллическом материале мало время роста двойников в зерне за счет высокой скорости их развития и мало их количество. При этом на диаграммах  $\sigma(\epsilon)$  ступеней не образуется.

Ранее [21] на образцах моно- и крупнокристаллических сплавов Fe + 3,25 % Si ( $d_{cp} \geq 10 \text{ мм}$ ) было показано, что зависимость интенсивности двойникования (общее число двойников в рабочей зоне) от температуры, а так-

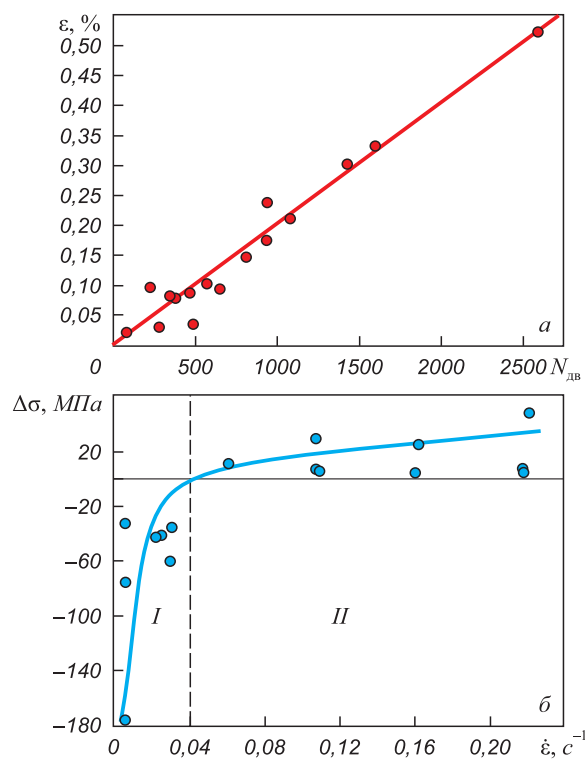


Рис. 2. Зависимость относительной деформации, связанной с двойникованием, от общего числа двойников в образце и величины и знака скачка напряжения на диаграмме нагрузка – деформация от скорости деформации образца (б)

Fig. 2. Dependence of relative deformation (a) associated with twinning on total number of twins in the sample, and magnitude and sign of strain surge on stress-strain diagram on strain rate of the sample (b)

же скорости деформирования имеют характерный максимум. В поликристаллах [22] (для среднего размера зерен 0,7 и 2,35 мм) с увеличением температуры от 293 до 393 К интенсивность двойникования снижается, а положение максимума количества двойников смещается в область более высоких температур при увеличении скорости деформирования.

Эксперименты на образцах с размером зерен  $d_{cp2} = 0,12$  мм показали, что общее число двойников в рабочей области не имеет явно выраженной зависимости от скорости деформирования. В этом случае количественной характеристикой двойникования считали среднее число двойников в зернах в зависимости от размера зерен поликристаллического сплава, а также скорости деформирования и температуры. В эксперименте определяли размеры, число сдвойникованных зерен и число образовавшихся в них двойников. Построены гистограммы распределения сдвойникованных зерен от размера зерен при различных температурах и скоростях нагружения (рис. 3, а).

Выявлено, что максимум распределения сдвойникованных зерен по размеру смещается в сторону

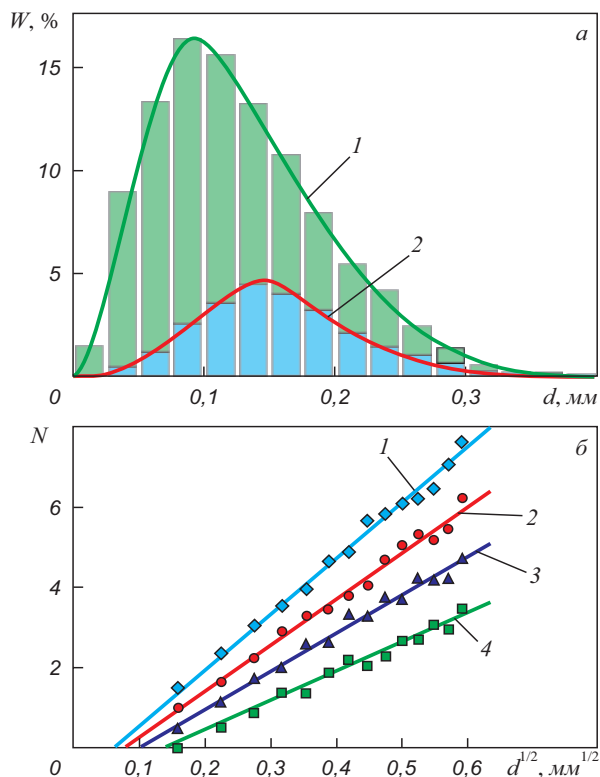


Рис. 3. Гистограммы распределения частоты появления зерен по размерам (а) в рабочей зоне образца в исходном состоянии (1), распределение сдвойникованных зерен (2), а также зависимость среднего числа двойников в зерне (б) от размера зерна при  $\dot{\epsilon} = 0,211 \text{ с}^{-1}$  и температурах 183 К (1), 243 К (2), 293 К (3), 343 К (4)

Fig. 3. Histograms of distribution of grains appearance frequency by size (а) in the working zone of the sample in the initial state (1), distribution of twinned grains (2), and dependence of the average number of twins in the grain (б) on grain size at  $\dot{\epsilon} = 0.211 \text{ s}^{-1}$  and the temperatures of 183 К (1), 243 К (2), 293 К (3), 343 К (4)

более крупных зерен относительно общего распределения зерен поликристалла по размерам (рис. 3, а). Среднестатистический размер сдвойникованных зерен ( $d_{cp}^{дв} = 0,15$  мм) также смещен в сторону более крупных размеров относительно среднестатистического размера зерен поликристалла ( $d_{cp2} = 0,12$  мм). Таким образом показано, что существует некоторый оптимальный размер зерен, предпочтительный для развития двойникования, который, как правило, больше среднестатистического размера зерен, определенного в исходном распределении зерен по размерам.

Установлено, что зависимость среднего числа двойников в зерне от квадратного корня из размера зерна при одной и той же температуре хорошо описывается линейной функцией (рис. 3, б). Показано, что при всех скоростях деформации можно выделить «характерный» минимальный размер зерен, двойникование в котором при данных условиях эксперимента отсутствует, что может быть объяснено законом Холла-Петча (на рис. 3, б минимальные размеры зерен отмечены стрелками).

Дальнейшие исследования показали (рис. 4), что среднее число двойников в зернах с максимальным количеством двойников ( $d_{cp}^{дв}$ ) при температурах выше примерно 273 К с ростом скорости деформирования возрастает, а при температурах менее 273 К – снижается. Такое изменение можно объяснить сменами механизмов деформации, конкурирующих между собой: при повышении температуры происходит переход от двойникования к скольжению, а при снижении температуры – обратный переход. Можно заключить, что для рассматриваемого сплава температура приблизительно 273 К является «характерной» температурой, при которой число двойников

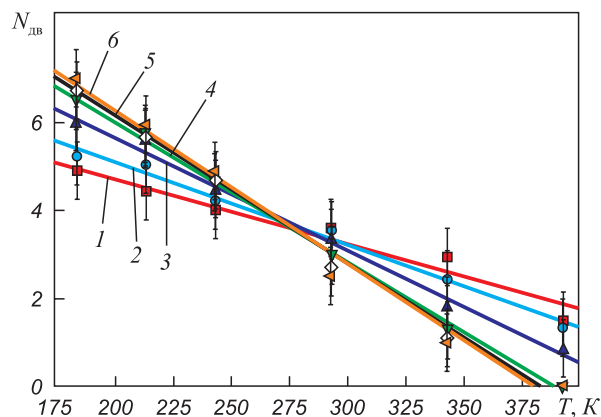


Рис. 4. Зависимости среднего числа двойников в сдвойникованном зерне среднестатистического размера мелкокристаллических образцов от температуры и скорости деформирования при разной скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$ :  
1 –  $1,9 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $8,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $5,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; 4 –  $3,1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ;  
5 –  $7,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ; 6 –  $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$

Fig. 4. Dependences of the average number of twins in twinned grain of an average size of fine crystalline samples on the temperature and deformation rate at  $\dot{\epsilon}$ :  
1 –  $1,9 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ; 2 –  $8,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; 3 –  $5,8 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; 4 –  $3,1 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  
5 –  $7,8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ; 6 –  $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

в максимально сдвойникованном зерне является постоянной величиной при любых скоростях деформирования.

**Выводы.** Исследования показали, что характер ступеней на диаграммах  $\sigma(\epsilon)$  при двойниковании электро-технической стали Э2412 зависит от скорости приложения нагрузки (для зерен  $d_{cp1} = 3,55$  мм). Величина  $\Delta\sigma$  изменяет знак при скорости деформации  $0,04$  с<sup>-1</sup>. Число образовавшихся двойников и величина вызванной ими деформации связаны линейной зависимостью при любых скоростях нагружения. Показано, что в распределении сдвойникованных зерен по размерам максимум смещен в сторону большего размера зерен по сравнению с исходным распределением зерен по размерам (для зерен  $d_{cp2} = 0,12$  мм). Интенсивность двойникования в максимально сдвойникованном образце зависит от температуры и скорости деформирования. Температура 273 К – некоторая критическая, при которой число двойников постоянно при любых скоростях нагружения. При температуре меньше 273 К число двойников с увеличением скорости деформирования снижается, а при температуре больше 273 К – возрастает.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Березовская В.В., Хадыев М.С., Меркушкин Е.А., Соколовская Ю.А. Влияние деформации на структуру, механические и коррозионные свойства высокоазотистой аустенитной стали 07X16AG13M3 // *Металлы*. 2013. № 6. С. 54 – 62.
2. Воронова Л.М., Чашухина Т.И., Дегтярев М.В., Пилюгин В.П. Эволюция и стабильность структуры меди, деформированной при 80 К // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 3. С. 9 – 11.
3. Мальцева Л.А., Левина А.В., Логинов Ю.Н. и др. Изменения структуры и свойств при деформации аустенитно-ферритной стали при комнатной и отрицательных температурах // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 11. С. 9 – 15.
4. Каблов Д.Е., Крапошин В.С., Герасимов С.А. Кристаллографический механизм образования двойников под влиянием азота при выращивании монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 7. С. 37 – 41.
5. Denk J., Dallmeier J., Huber O., Saage H. The fatigue life of notched magnesium sheet metals with emphasis on the effect of bands of twinned grains // *International journal of fatigue*. 2017. Vol. 98. P. 212 – 222.
6. Khan S.A., Chivavibul P., Sedlak P. etc. M. Analysis of Acoustic Emission Signals during Tensile Deformation of Fe-Si Steels with Various Silicon Contents // *Metallurgical and materials transactions a-physical metallurgy and materials science*. 2013. Vol. 44A. No. 8. P. 3623 – 3634.
7. Kireeva I.V., Chumlyakov Yu.I., Pobedennaya Z.V. etc. Slip and twinning in the [49]-oriented single crystals of a high-entropy alloy // *Russian physics journal*. 2016. Vol. 59. No. 8. P. 1242 – 1250.
8. Hai-Tao Liu, Zhen-Yu Liu, Yu Sun etc. Development of l-fiber recrystallization texture and magnetic property in Fe-6.5 wt % Si thin sheet produced by strip casting and warm rolling method // *Materials Letters*. 2013. No. 91. P. 150 – 153.
9. Zhen Zhang, Ming-pu Wang, Nian Jiang, Shu-mei Li. Orientation analyses for twinning behavior in small-strain hot-rolling process of twin-roll cast AZ31B sheet // *Materials Science and Engineering. A*. 2010. Vol. 527. P. 6467 – 6473.
10. Дробышевская Т.В., Остриков О.М. Задача о расчете напряженно-деформированного состояния, обусловленного единичным двойником в зерне различной формы // *Наука и техника*. 2016. Т. 15. № 3. С. 247 – 260.
11. Шмагток Е.В., Остриков О.М. Влияние трещины поперечного сдвига на особенности распределения напряжений у единичного линзовидного механического двойника в сплавах Ni2MnGa // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2016. № 2. С. 63 – 67.
12. Mizuguchi T., Ikeda K., Karasawa N. Effects of Temperature and Strain Rate on Deformation Twinning in Fe-Si Alloy // *Isij international*. 2015. Vol. 55. No. 7. P. 1496 – 1501.
13. Huadong Fu, Zhihao Zhang, Yanbin Jiang, Jianxin Xie. Applying the grain orientation dependence of deformation twinning to improve the deformation properties of an Fe-6.5 wt % Si alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 689. P. 307 – 312.
14. Moskalenko V.A., Smirnov A.R., Smolyanets R.V. Low-temperature plastic deformation and strain-hardening of nanocrystalline titanium // *Low temperature physics*. 2014. Vol. 40. No. 9. P. 837 – 845.
15. Чикова Т.С., Башмаков В.И. Обратимая пластичность металлических монокристаллов на стадии их остаточного двойникования // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. 2016. № 4. С. 9 – 21.
16. Sharma A., Chhangani S., Madhavan R., Suwas S. Correlation between crystallographic texture, microstructure and magnetic properties of pulse electrodeposited nanocrystalline nickel-cobalt alloys // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2017. Vol. 434. P. 68 – 77.
17. Mine Y., Nakamichi S., Koga K. etc. Deformation behavior of nano-twinning single crystals of an Fe-19Cr-16Ni austenitic alloy // *Materials science and engineering a-structural materials properties microstructure and processing*. 2016. Vol. 675. P. 181 – 191.
18. Joshi K., Joshi S.P. Interacting effects of strengthening and twin boundary migration in nanotwinned materials // *Journal of the mechanics and physics of solids*. 2017. Vol. 101. P. 180 – 196.
19. Моисеев В.Ф., Трефилов В.И. Пластичность при двойниковании. – В кн.: Физическая природа пластической деформации и разрушения металлов. – Киев: Наукова думка, 1969. С. 7 – 15.
20. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
21. Финкель В.М., Савельев А.М., Королев А.П. О температурной зависимости интенсивности и кинетики развития двойникования при динамическом растяжении кремнистого железа // *Физика металлов и металлосведение*. 1979. Т. 47. № 2. С. 411 – 419.
22. Федоров В.А., Плужников С.Н., Плужникова Т.Н. и др. Влияние температуры и скорости нагружения на количественные характеристики сопутствующего двойникования в поликристалле Fe + 3,25 % Si // *Деформация и разрушение материалов*. 2007. № 7. С. 13 – 16.

Поступила 10 марта 2017 г.

## INFLUENCE OF DEFORMATION RATE, GRAIN SIZE AND TEMPERATURE ON MECHANICAL TWINNING IN ELECTRICAL STEEL E2412

V.A. Fedorov, A.M. Kirillov, T.N. Pluzhnikova

Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russia

**Abstract.** Deformation features of fine-grained steel E2412 with 3.63 % silicon concentration and different grain sizes, mainly deforming by twinning, have been considered. Samples were stretched with In-



stron-5565 machine at deformation rates  $\dot{\epsilon} \approx 0.002 \div 0.660 \text{ s}^{-1}$  during heating in temperature interval of  $183 \div 393 \text{ K}$ . Constantly, two types of specimens among which are 80 % with grain sizes of  $1,5 \div 9 \text{ mm}$  and  $0,025 \div 0,225 \text{ mm}$ , have been experimentally studied. General connection between the number of crystal twins, step-like view of crystal load curve and deformation rate (for grains with  $d_{av1} = 3.55 \text{ mm}$ ) have been determined. Generation of steps is accompanied by detectable decrease of load due to high rate of twin forming at low rates of load. The value of load dropping decreases with increase of load rate. The value  $\Delta\sigma$  reverses the sign at deformation rate  $\dot{\epsilon} \approx 0.04 \text{ s}^{-1}$ . The authors did not observe detectable load surges in finely crystalline steel at formation of twins ( $d_{av2} = 0.12 \text{ mm}$ ). High-speed forming of twins and their small amounts lead to decrease of twin forming time in a single grain in finely crystalline material. Distribution histograms for twinned grains as functions of grain size, temperature and load rates have been plotted. It has been detected that distribution maximum of twinned grains shifts toward bigger grain against general size distribution in polycrystal. It has been determined that optimum grain size, being preferred for twinning and exceeding average grain size at initial size distribution, exists. It has been also shown that number of crystal twins depends on test temperature and deformation rate in a separate grain. Twinning intensity depends on temperature and deformation rate in maximum twinned sample. Deformation temperature, retaining constant number of crystal twins at main experimental rates, exists.

**Keywords:** electrical steel, twinning, BCC-lattice, graph of stress-strain, grain size, temperature, strain rate, polycrystal.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-6-469-473

## REFERENCES

- Berezovskaya V.V., Khadyev M.S., Merkushev E.A., Sokolovskaya Yu.A. Influence of deformation on the structure and mechanical and corrosion properties of high-nitrogen austenitic 07Kh16AG13M3 steel. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, no. 11, pp. 855–862.
- Voronova L.M., Chashchukhina T.I., Degtyarev M.V., Pilyugin V.P. Evolution and stability of copper structure deformed at 80 K. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2011, no. 3, pp. 9–11. (In Russ.).
- Mal'tseva L.A., Levina A.V., Loginov Yu.N., Gladkovskii S.V., Mal'tseva T.V., Demidov S.A., Khadyev M.S. Changes in the structure and properties under deformation of austenitic-ferritic steel at room and negative temperatures. *Metal Science and Heat Treatment*. 2016, vol. 57, no. 11-12, pp. 645–651.
- Kablov D.E., Kraposhin V.S., Gerasimov S.A. Crystallographic mechanisms of compound crystals formation under the nitrogen influence at temperature resistant nickel alloys monocrystals growing. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2012, no. 7, pp. 37–41. (In Russ.).
- Denk J., Dallmeier J., Huber O., Saage H. The fatigue life of notched magnesium sheet metals with emphasis on the effect of bands of twinned grains. *International Journal of Fatigue*. 2017, vol. 98, pp. 212–222.
- Khan S.A., Chivavibul P., Sedlak P., Arai S., Enoki M. Analysis of acoustic emission signals during tensile deformation of Fe-Si steels with various silicon contents. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*. 2013, vol. 44A, no. 8, pp. 3623–3634.
- Kireeva I.V., Chumlyakov Yu.I., Pobedennaya Z.V., Platono-va Yu.N., Kuksgauzen I.V., Kuksgauzen D.A., Poklonov V.V., Karaman I., Sehitoglu H. Slip and twinning in the [49]-oriented single crystals of a high-entropy alloy. *Russian Physics Journal*. 2016, vol. 59, no. 8, pp. 1242–1250.
- Hai-Tao Liu, Zhen-Yu Liu, Yu Sun, Fei Gao, Guo-Dong Wang. Development of l-fiber recrystallization texture and magnetic property in Fe–6.5 wt % Si thin sheet produced by strip casting and warm rolling method. *Materials Letters*. 2013, no. 91, pp. 150–153.
- Zhen Zhang, Ming-pu Wang, Nian Jiang, Shu-mei Li. Orientation analyses for twinning behavior in small-strain hot-rolling process of twin-roll cast AZ31B sheet. *Materials Science and Engineering. A*. 2010, vol. 527, pp. 6467–6473.
- Drobyshevskaya T.V., Ostrikov O.M. Matter of calculation of strain-stress state, determined by a singular twin in a grain of different forms. *Nauka i tekhnika*. 2016, vol. 15, no. 3, pp. 247–260. (In Russ.).
- Shmatok E.V., Ostrikov O.M. Influence of crack of perpendicular shear on distribution of strains in singular lenticular mechanic compound crystals in  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  alloys. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2016, no. 2, pp. 63–67. (In Russ.).
- Mizuguchi T., Ikeda K., Karasawa N. Effects of temperature and strain rate on deformation twinning in Fe-Si alloy. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 7, pp. 1496–1501.
- Huadong Fu, Zhihao Zhang, Yanbin Jiang, Jianxin Xie. Applying the grain orientation dependence of deformation twinning to improve the deformation properties of an Fe-6.5 wt%Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, vol. 689, pp. 307–312.
- Moskalenko V.A., Smirnov A.R., Smolyanets R.V. Low-temperature plastic deformation and strain-hardening of nanocrystalline titanium. *Low Temperature Physics*. 2014, vol. 40, no. 9, pp. 837–845.
- Chikova T.S., Bashmakov V.I. Reversible plasticity of metallic monocrystals at their residual twinning stage. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2016, no. 4, pp. 9–21. (In Russ.).
- Sharma A., Chhangani S., Madhavan R., Suwas S. Correlation between crystallographic texture, microstructure and magnetic properties of pulse electrodeposited nanocrystalline Nickel-Cobalt alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017, vol. 434, pp. 68–77.
- Mine Y., Nakamichi S., Koga K., Takashima K., Kraft O. Deformation behavior of nano-twinning single crystals of an Fe-19Cr-16Ni austenitic alloy. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2016, vol. 675, pp. 181–191.
- Joshi K., Joshi S.P. Interacting effects of strengthening and twin boundary migration in nanotwinned materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2017, vol. 101, pp. 180–196.
- Moiseev V.F., Trefilov V.I. Plasticity at twinning. In: *Fizicheskaya priroda plasticheskoi deformatsii i razrusheniya metallov* [Physical nature of plastic deformation and fracture of metals]. Kiev: Naukova dumka, 1969, pp. 7–15. (In Russ.).
- Zolotarevskii V.S. *Mekhanicheskie svoistva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p. (In Russ.).
- Finkel' V.M., Savel'ev A.M., Korolev A.P. Influence of temperature on twin formation in silicon iron. *Physics of Metals and Metallography*. 1979, vol. 47, no. 3, pp. 166–173.
- Fedorov V.A., Pluzhnikov S.N., Pluzhnikova T.N., Dudakov S.P., Kirillov A.M. Influence of temperature and straining rate on quantitative characteristics of concurrent twinning in Fe + 3,25 % Si polycrystal. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2007, no. 7, pp. 13–16. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by Russian Fund of Fundamental Research (grant no. 15-41-03166\_r\_center\_a).

## Information about the authors:

**V.A. Fedorov**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor of the Chair of Theoretical and Experimental Physics (fedorov@tsu.tmb.ru)  
**A.M. Kirillov**, Cand. Sci. (Phys.-math.), Research Associate of the Chair of Theoretical and Experimental Physics (kirillov@tsu.tmb.ru)  
**T.N. Pluzhnikova**, Cand. Sci. (Phys.-math.), Assist. Professor of the Chair of Theoretical and Experimental Physics (pluzhnik@mail.ru)

Received March 10, 2017