

ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ ОБРАЗОВАНИЯ ПОР ПО КРИСТАЛЛОГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СКОЛЬЖЕНИЯ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ЖЕЛЕЗЕ

*Д.В. ПАВЛЮКОВА¹, аспирант
G. GERSTEIN², Doktor
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²Leibniz Universität Hannover)*

Статья поступила 27 апреля 2012 года

Павлюкова Д.В. – 630092, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет, e-mail: pavlyukova_87@mail.ru

Изучены особенности деформационного рельефа, формируемого на поверхности образца из поликристаллического железа при деформации по схеме сжатия. Определены индексы семейств плоскостей скольжения, наблюдаемых на поверхности кристалла в виде линий скольжения. Выявлены основные пересечения линий скольжения, которые приводят к формированию пор.

Ключевые слова: деформационный рельеф, линии скольжения, поры

Известно, что пластическая деформация оказывает существенное влияние на механические свойства металлических материалов. Деформация способствует упрочнению материалов, может привести к образованию дефектов различного типа и даже к их разрушению. Образование дефектов в материале, обусловленное деформационными процессами, зависит от таких факторов, как степень и интенсивность пластической деформации, а также тип деформируемого материала. Определение степени и максимальной скорости пластической деформации, при которых начинается образование дефектов, является важной научной и практической задачей.

Одним из способов оценки процессов, развивающихся в деформируемом материале, является изучение деформационного рельефа. При нагружении полированного образца на его поверхности возникают полосы, соответствующие основным плоскостям скольжения, действующим в кристалле. В совокупности эти полосы образуют деформационный рельеф. В определенных условиях нагружения на фоне деформационного рельефа могут быть зафиксированы различного вида дефекты, в том числе поры и микротрещины.

Путем анализа кристаллогеометрических характеристик скольжения возможно определить условия возникновения микропор и микротрещин на различных стадиях деформации образца. В работе были исследованы образцы, деформированные со степенью 30 %. При изучении деформационного рельефа, сформированного при нагружении поликристаллического железа, одновременно со следами скольжения на поверхности образца наблюдаются поры.

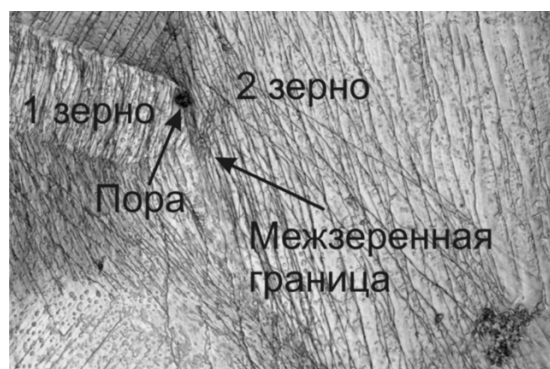
Целью данного исследования являлось определение кристаллогеометрических характеристик скольжения дислокаций в зонах образования пор.

В качестве исследуемого материала было выбрано технически чистое поликристаллическое железо, химический состав которого приведен в табл. 1. В процессе предварительного исследования пор в структуре материала обнаружено не было.

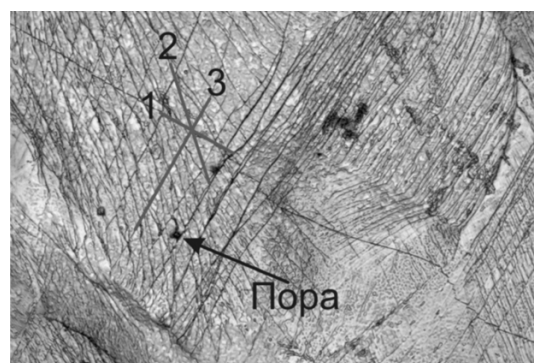
Таблица 1

Химический состав исследуемого материала

C, %	Mn, %	P, %	S, %	Fe, %
0,018	0,025	0,008	0,003	99,95



а



б

Рис. 1. Формирование поры на границе зерен (а); на пересечении линий скольжения в пределах отдельно взятого зерна (б); 1, 2 и 3 – линии скольжения, принадлежащие различным системам скольжения

Для проведения экспериментов из массивного материала был вырезан образец размером $5 \times 5 \times 5$ мм. С использованием алмазных паст зернистостью менее 1 мкм образец с четырех сторон был механически отполирован. Далее материал был деформирован со степенью 30 % по схеме одноосного сжатия. Эта величина была выбрана на основании предварительных исследований как соответствующая деформации, при которой в деформируемом материале формируются поры.

Исследование деформационного рельефа проводилось на лазерном конфокальном микроскопе Keyence VK-9700 с разрешающей способностью до 1 нм по оси z и 10 нм по осям x и y . Съемку осуществляли при стократном увеличении. Обработку данных проводили с использованием программы VK Analyzer.

Статистический анализ результатов исследования деформационного рельефа показал, что при увеличении $\times 100$ поры обнаруживаются на каждом четвертом из исследуемых изображений. Следует выделить несколько закономерностей образования дефектов. В 30 % случаев формирование зоны повреждения происходит на границе двух или более зерен (субзерен), которые явно различимы по разориентировке линий скольжения (рис. 1, а). Однако большая часть пор была сформирована в пределах отдельно взятого зерна. Как правило, поры были образованы на пересечении нескольких линий скольжения (рис. 1, б).

Следует отметить, что не все дефекты, обнаруженные в деформационном рельефе, являются порами. На рис. 2 представлен дефект другого

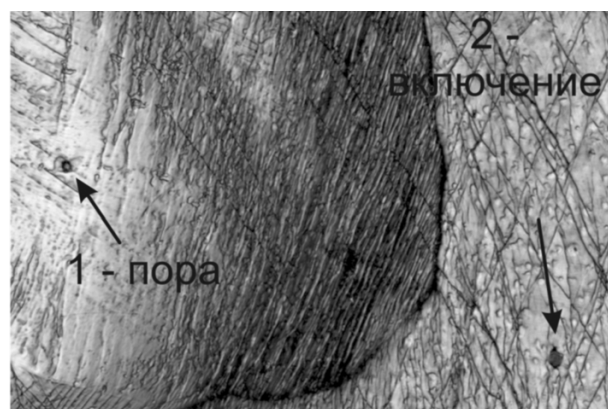
типа, служащий включением. Об этом качественно можно судить по отклонению линии скольжения от прямой линии. В данном случае линия скольжения огибает пору.



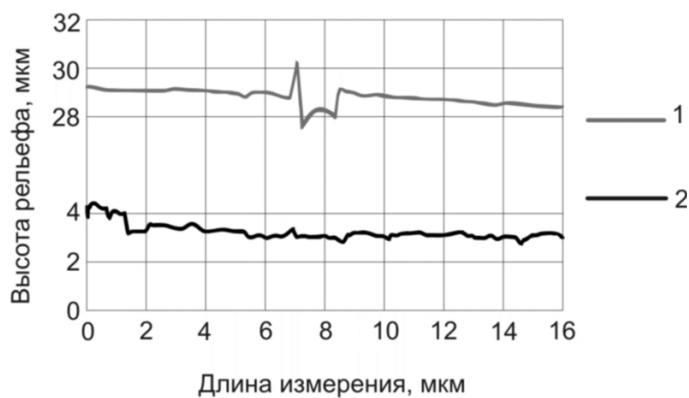
Рис. 2. Неметаллическое включение на поверхности деформированного образца

С целью достоверной идентификации пор было проведено исследование профиля поверхности образца. Измерение высоты деформационного рельефа позволило выявить резкое изменение профиля в некоторых дефектных зонах (рис. 3). Это изменение позволяет утверждать, что в данных случаях мы наблюдаем именно поры. В то же время при измерении высоты рельефа в зоне дефектов другого типа изменение высоты профиля поверхности не наблюдается.

Идентифицировать плоскости скольжения, выходящие на поверхность зерна и формирующие деформационный рельеф, можно по углам, которые образуются при пересечении линий скольжения. Для расчета углов между различными плоскостями, принадлежащими трем основ-



а



б

Рис. 3. Идентификация поры по изменению высоты профиля деформационного рельефа:

а – картина деформационного рельефа; б – профиль зоны, включающей пору 1; профиль зоны, содержащей дефект другого типа 2

ным системам скольжения в ОЦК-металлах, которыми являются плоскости $\{110\}$, $\{112\}$ и $\{123\}$, была использована формула¹

$$\theta_{ij} = \arccos \frac{h_i h_j + k_i k_j + l_i l_j}{\sqrt{h_i^2 + k_i^2 + l_i^2} \sqrt{h_j^2 + k_j^2 + l_j^2}},$$

где θ_{ij} – угол между ними; $(h_i k_i l_i)$ и $(h_j k_j l_j)$ – индексы двух плоскостей.

Приведенная формула позволила рассчитать все возможные варианты пересечения плоскостей семейств $\{110\}$, $\{112\}$ и $\{123\}$. Данные об углах представлены в табл. 2.

Методика определения плоскостей, по которым осуществляется скольжение в отдельно взятом зерне, заключалась в следующем. С микрофотографии, полученной с помощью конфокального микроскопа, были сняты три линии, принадлежащие различным системам скольжения. Следует отметить, что выбранные плоскости принадлежали области, прилегающей к дефекту. Далее между ними были измерены углы, которые сравнивались с углами, полученными расчетным методом. Совпадение измеренных и рассчитанных углов позволяло идентифицировать плоскости скольжения, на пересечении которых данные углы образуются. В связи с высокими степенями пластической деформации следы плоскостей скольжения на поверхности зерна имеют погрешность, которая может составлять $\pm 5^\circ$ от измеренного значения угла. Таким образом, из таблицы были выбраны значения углов, не

только точно совпадающих с измеренными, но и имеющих близкие к ним значения. С целью повышения точности сопоставления измеренных и рассчитанных значений идентификация плоскостей скольжения осуществлялась по трем углам. Условия образования дефекта оценивались по скольжению в трех плоскостях.

Учитывая погрешность измерения, достоверно определить плоскости скольжения в некоторых зернах крайне затруднительно. Следовательно, существует несколько возможных вариантов пересечения плоскостей.

В процессе проведенной работы было установлено, что наиболее часто поры формируются в зернах, для которых характерно пересечение плоскостей $\{112\}$, $\{123\}$, $\{123\}$. Кроме того, образованию повреждений может способствовать пересечение плоскостей ($\{110\}$, $\{112\}$, $\{123\}$); ($\{110\}$, $\{123\}$, $\{123\}$); ($\{112\}$, $\{112\}$, $\{123\}$) и ($\{123\}$, $\{123\}$, $\{123\}$). Вероятность образования рассматриваемых пересечений приведена в порядке убывания.

Глубина поры варьируется в широких пределах и может достигать десятков микрометров. Максимальная глубина поры, образованной на границе зерен, составляет 138 мкм. Поры, глубина которых достигает десятков микрометров, были сформированы в зернах, в которых скольжение чаще всего проходило по плоскостям: ($\{112\}$, $\{123\}$, $\{123\}$); ($\{110\}$, $\{112\}$, $\{123\}$); ($\{110\}$, $\{123\}$, $\{123\}$). Высота ступенек деформационного рельефа в рассматриваемых зернах на-

¹ Andrews K.W., Dyson D.J., Keown S.B. Interpretation of electron diffraction patterns. – London, 1968.

Таблица 2

Возможные углы между плоскостями

Семейства плоскостей скольжения	110	112	123
110	90°		
	0°/ 180°		
	60°/ 120°		
112	90°	60°/ 120°	
	30°/ 150°	48,1897°/ 131,8103°	
	54,7356°/ 125,2643°	70,5288°/ 109,4712°	
	73,2213°/ 106,7786°	80,40593°/ 99,5941°	
		33,5573°/ 146, 4427°	
123	55,4624°/ 124,5376°	10,8933°/ 169,1066°	0°/ 180°
	79,1066°/ 100,8939°	40,2029°/ 139,7971°	60°/ 120°
	40,8934°/ 139,1066°	56,9381°/ 123,0619°	73,3985°/ 106,6015°
	67,7923°/ 112,2076°	70,8933°/ 109,1066°	31,0027°/ 148,9973°
	19,1066°/ 160,8933°	29,2059°/ 150,7941°	64,6231°/ 115,9973°
		49,1066°/ 130,8934°	38,2132°/ 141,7868°
		77,3956°/ 102,6044°	85,9039°/ 94,0960°
		83,7360°/ 96,2639°	21,7867°/ 158,2132°
		90°	69,0752°/ 110,9248°
			49,9948°/ 130,0052°
			44,4153°/ 135,5847°
			81,7867°/ 98,3132°

ходится в пределах от 0,42 до 1,67 мкм. Следует отметить, что чаще всего глубокие поры образуются при высоте рельефа ~1 мкм или более. При этом максимальной высоты ступеньки рельефа достигают при пересечении линий скольжения в семействах плоскостей ({110}, {112}, {123}); ({112}, {123}, {123}) или ({112}, {112}, {123}). Высоте рельефа от 0,2 до 0,5 мкм соответствуют поры, не превышающие по глубине 5 мкм, как правило, образующиеся на пересечении линий, соответствующих плоскостям ({110}, {112},

{123}); ({112}, {123}, {123}); ({123}, {123}, {123}); ({110}, {112}, {123}).

Изменение глубины поры и высоты деформационного рельефа в различных зернах можно объяснить, опираясь на дислокационную природу пластической деформации. Во-первых, длина пробега дислокаций является во всех случаях индивидуальной величиной и изменяется при переходе от зерна к зерну, что приводит к различиям высот деформационного рельефа и различной глубине пор. В то же время большая

глубина поры может быть связана со скоплением внутри материала множества сформированных вследствие скольжения дислокаций в одном параллельном направлении пор и выходом результирующей поры на поверхность материала. Еще одним объяснением описанных явлений может служить развитие скольжения в перпендикулярном растущей поре направлении или в направлении, близком к перпендикулярному. Такое скольжение может быть вызвано активацией латентных плоскостей, скольжение в которых обеспечивается высокими степенями деформации. Однако подтвердить достоверно это предположение довольно затруднительно, поскольку обнаружить скольжения в латентных плоскостях, применяя существующие в настоящее время методы исследования, практически невозможно.

К одной из особенностей образования поры на границе раздела двух зерен можно отнести разницу в высоте ступенек деформационного рельефа. Как правило, высота ступенек рельефа одного из зерен близка к интервалу минимальных значений ступенек деформационного рельефа (0,2...0,5 мкм). Для второго зерна высота ступенек находится в диапазоне 0,8...1,0 мкм. Таким образом, разница между высотой ступенек деформационного рельефа двух зерен, на границе которых образуется пора, составляет в среднем ~0,5 мкм.

Метод оценки дефектов в пластически деформированном материале по деформационному рельефу является эффективным с точки зрения механики разрушения, так как дает возможность описать характер порообразования в зависимости от кристаллогеометрии материала.

На основании проведенного в работе анализа кристаллогеометрических характеристик скольжения пластически деформированного поликристаллического железа можно сделать следующие выводы.

Поры в материале, формируемые в процессе приложения сжимающей нагрузки, могут возникать как внутри зерна, так и на границе двух или нескольких соседних зерен.

- Методом конфокальной микроскопии можно достоверно отличить пору от дефекта другого типа по изменению высоты деформационного рельефа.

- Основными пересечениями плоскостей скольжения в ОЦК-материале, на которых формируются поры, являются: $\{112\} \times \{123\} \times \{123\}$; $\{110\} \times \{112\} \times \{123\}$; $\{110\} \times \{123\} \times \{123\}$; $\{112\} \times \{112\} \times \{123\}$; $\{123\} \times \{123\} \times \{123\}$.

- Глубина пор в большинстве случаев находится в зависимости от высоты ступенек деформационного рельефа. Таким образом, высота ступенек линий скольжения может быть качественным критерием характера образования пор.

Следует отметить особенность, касающуюся применения данного метода. С увеличением степени деформации идентификация плоскостей скольжения усложняется, следовательно, применение метода может быть максимально эффективным при наличии полного набора образцов с различными степенями деформации, начиная с самых минимальных. Кроме того, это позволит судить о том, на какой именно стадии деформации начинают формироваться поры.

Estimation of the void formation criteria on the characteristics of the crystal geometry of the polycrystalline iron

D.V. Pavliukova, G. Gerstein

Particularities of the deformation relief which was formed on a surface of the polycrystalline iron during the compressive deformation were investigated. Indexes of the slip planes families observed on a crystal surface as slip lines was determined. The main slip planes intersections which lead to the void formation were identified.

Key words: deformation relief, slip lines, voids