

УДК 548.0

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СКРАЙБИРОВАНИЯ НА ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДВОЙНИКОВ В МОНОКРИСТАЛЛЕ ВИСМУТА

Н. М. СИМАНОВИЧ

аспирант

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

О. М. ОСТРИКОВ

кандидат физико-математических наук, доцент

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

М. П. КУЛЬГЕЙКО

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Методом скрайбирования поверхности алмазным индентором установлены средние статистические характеристики двойникования в зависимости от скорости образования царапины при различной нагрузке на индентор и длине скрайбирования. Выявлено, что при сложной неоднозначной характеристике образования двойников при скрайбировании имеется общая тенденция увеличения количества двойников, их геометрических параметров и степени некогерентности двойниковых границ с увеличением скорости скрайбирования и нагрузки на индентор.

Ключевые слова: механическое двойникование, скрайбирование, висмут.

Введение

Двойникование является одним из основных видов пластической деформации твердых тел и проявляется преимущественно в условиях затруднительной реализации процесса скольжения [1–4]. Роль механического двойникования в процессах разрушения материалов достаточно противоречива. В одних условиях двойники способствуют зарождению трещин и являются причиной разрушения, в других – являются резервом пластичности материалов [3–6]. В связи со значительной неопределенностью роли двойникования в разрушении и деформировании металлов и сплавов важной задачей является изучение закономерностей образования двойниковых ансамблей в условиях воздействия различных факторов деформационного нагружения. Исследование механического двойникования является актуальным также в связи с перспективой развития принципа инженерии границ зерен, основанного на конкуренции различных механизмов пластической деформации [7].

Основные механические характеристики материалов (модуль упругости, предел текучести, предел прочности, пластичность и трещиностойкость) с точки зрения современных теорий связаны с различными микромеханизмами локальной деформации, в том числе с зарождением, движением и аннигиляцией дислокаций, разориентацией и изменением структуры кристаллической решетки, микропластичностью [8]. В то же время отмечается [8], что прогнозирование механических характеристик материалов с использованием моделей, в основе которых лежат указанные механизмы, имеют большую неопределенность.

Пластическая деформация путем механического двойникования осуществляется при различных видах и способах нагружения [2–4], которые возможны в реальных условиях эксплуатации технических систем. Процессы двойникования наблюдаются при разных видах деформирования образцов (растяжении, сжатии, кручении и др.) и при различном воздействии на поверхность металла более твердым телом, например, путем вдавливания, царапания и т. п. Двойникование может проявляться при квазистатическом, динамическом, вибрационном,

© Симанович Н. М., 2018

© Остриков О. М., 2018

© Кульгейко М. П., 2018

циклическом и других способах нагружения. То есть условия, при которых исследуются процессы двойникования, имитируют различные процессы нагружения и разрушения деталей машин и механизмов.

В работе [3] обобщены результаты многочисленных экспериментальных исследований процессов двойникования при квазистатическом и динамическом нагружении в широком диапазоне скоростей деформирования и других факторов воздействия. Отмечается, что на двойникование наряду с температурой существенное влияние оказывает скорость нагружения и кристаллографическая ориентация образца [1, 3], и, следовательно, к максимальному эффекту пластичности при двойниковании может привести некоторое определенное сочетание данных факторов. При этом следует отметить, что представленные закономерности и выводы были установлены на основе изучения двойникования, преимущественно, в условиях растяжения и индентирования. Очевидно, что в других условиях нагружения сочетание факторов, сопровождающих двойникование, может быть иным.

Исследование двойникования при скрайбировании и сопутствующих ему деформационных явлениях позволяет значительно расширить понимание таких процессов разрушения, как царапание при трении, микрорезание и т. п. То есть при изучении скрайбирования как аналога указанных процессов представляется возможным установить закономерности пластической деформации и разрушения поверхности, а следовательно, иметь информацию для изменения и управления ее свойствами [4]. В ранее выполненных исследованиях [9, 10] установлены некоторые закономерности зарождения и развития двойников в зависимости от условий скрайбирования и особенности формирования двойниковых ансамблей в различных областях царапины. При скрайбировании картина двойникования отличается большей многофакторностью, и, следовательно, большей неопределенностью по сравнению с образованием двойниковых ансамблей при вдавливании индентора. Наиболее значительные особенности двойникования наблюдаются вдоль границ царапины. Отмечается также зависимость формирования двойников от кристаллографического направления скрайбирования и геометрических параметров царапины.

Цель работы – исследование особенностей образования двойников при различных скоростях скрайбирования поверхности монокристалла висмута.

Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования проводились на монокристаллах висмута, выращенных горизонтальным методом Бриджмена. Образцы получали раскалыванием выращенных монокристаллов вдоль плоскости спайности (111). В качестве индентора использовалась алмазная пирамида Виккерса микротвердомера ПМТ-3. Исследования проводились в условиях последовательного воздействия на конденсированную систему комбинированной нагрузкой: вначале вдавливанием индентора нагрузкой $P = 0.1, 0.2$ и 0.3 Н, а затем скрайбированием в направлении ребра пирамиды. Скрайбирование осуществляли длиной $L_c = 50, 100$ и 150 мкм со скоростью $V = 16.65, 33.35$ и 50 мкм/с под углом $\alpha = 0^\circ, 15^\circ$ и 30° относительно выделенного направления двойникования. Геометрия, форма и расположение двойников и сопутствующая им деформационная картина изучались методом оптической микроскопии. Аналогично [9, 10] анализ двойниковых ансамблей выполняли с выделением трех областей образования и развития двойников: область отпечатка при опускании индентора; область вдоль границ царапины; область останковки индентора.

Решение поставленной задачи осуществлялось на основе математической модели процесса двойникования. Учитывая сложную многофакторную зависимость процесса, исследования проводились с использованием планирования эксперимента и математической обработки данных. На основе ранее выполненных исследований [10] установлено, что геометрические параметры имеют нелинейную зависимость от факторов воздействия, а одномерные зависимости функций выхода представляют собой кривые близкие к кривым второго порядка. Поэтому искомую зависимость находили в виде уравнения регрессии второй степени

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2,$$

где y – выборочная оценка функции отклика, b_0, b_1, b_{ij}, b_{ii} – выборочные коэффициенты регрессии, x_j, x_j – кодированные значения факторов, k – число независимых факторов.

С целью снижения трудоемкости эксперимента при числе факторов $k = 4$ для определения параметров математической модели был принят некомпозиционный план второго порядка [11]. Значимость коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента, а проверку адекватности модели проводили по F -критерию Фишера. Далее уравнение регрессии представляли в натуральных значениях факторов и строили графические зависимости параметров двойников от факторов воздействия. В представленной работе выполнен анализ формирования двойниковых ансамблей вдоль границ царапины, образованной под углом $\alpha = 0^\circ$ относительно выделенного направления двойникования.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1-4 представлены графики зависимости исследуемых параметров двойниковых ансамблей, образованных вдоль границ царапины, от скорости скрайбирования при $\alpha = 0^\circ$. Графики геометрической интерпретации результатов исследований показывают зависимость средних значений количественных параметров: число двойников $N_{об}$, толщина двойников у устья $H_{об}$, длина двойников $L_{об}$ и степень некогерентности двойниковых границ $\eta = H_{об}/L_{об}$ – от изменения скорости образования царапины для нескольких значений нагрузки P на индентор при фиксированном значении длины скрайбирования L_c .

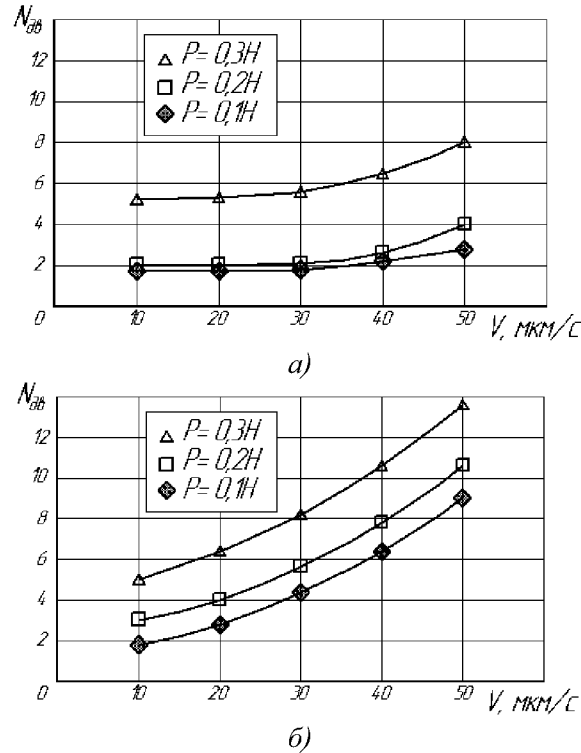
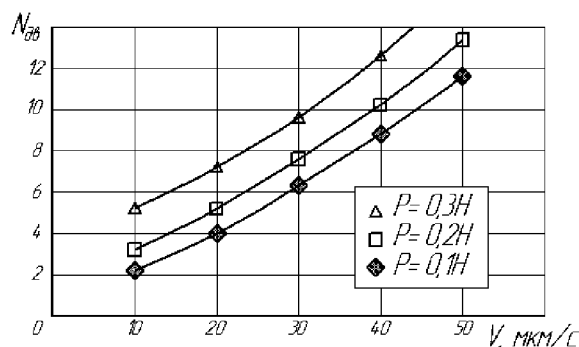


Рис. 1. Зависимость количества двойников $N_{об}$ от скорости скрайбирования:
 а – $L_c = 50$ мкм; б – $L_c = 100$ мкм; в – $L_c = 150$ мкм



б)

Продолжение рисунка 1

С увеличением скорости скрайбирования количество двойников увеличивается для всех P и L_c (рис. 1). Однако при небольшой длине скрайбирования ($L_c = 50$ мкм) количество двойников увеличивается незначительно, и для $P=0,1$ и $0,2$ Н график $N = f(V)$ начинает заметно возрастать только при $V > 40$ мкм/с (рис. 1, а). Более интенсивно возрастает число двойников $N_{об}$ с увеличением V при длине скрайбирования $L_c = 100$ мкм (рис. 1, б) и особенно резкое повышение $N_{об}$ отмечается для $L_c = 150$ мкм (рис. 1, в).

Следует отметить, что при большой длине скрайбирования L_c не просто увеличивается количество двойников (что логично объясняется увеличением длины царапины, т. е. области возможного образования двойников), а увеличение числа двойников $N_{об}$ сопровождается повышением скорости V скрайбирования, т. е. увеличение $N_{об}$ вызвано увеличением V . Об этом свидетельствует, например, тот факт, что при малой скорости скрайбирования (V до 20 мкм/с) количество двойников вдоль царапины остается практически постоянным для различных значений L_c (см. графики на рис. 1, б и в).

Таким образом, количество образовавшихся двойников вдоль царапины зависит от многих факторов: нагрузки на индентор, кристаллографического направления, длины пути и скорости скрайбирования. С увеличением нагрузки P на индентор число двойников $N_{об}$ увеличивается, при этом характер зависимости $N_{об} = f(P)$ остается практически постоянным при прочих равных условиях.

Нагрузка на индентор оказывает значительное влияние на процесс образования двойников [3, 4], особенно при скрайбировании [9, 10], так как определяет напряженно-деформированное состояние материала монокристалла, в том числе вдоль границ царапины. В работе [12] отмечается, что рост внешней нагрузки при индентировании также приводит к увеличению количества двойников. И увеличение скорости деформирования при других видах нагружения способствует двойникованию [3].

На основании многочисленных исследований в работах [1, 3] утверждается, что наряду с температурой на двойникование существенное влияние оказывает скорость нагружения и кристаллографическая ориентация образца. И к максимальному эффекту пластичности при двойниковании может привести некоторое оптимальное сочетание этих факторов.

Для кристаллографического направления $\alpha = 0^\circ$ с увеличением скорости скрайбирования при $L_c = 50$ мкм число двойников остается практически постоянным (рис. 1, а) и растет при $L_c = 100$ мкм (рис. 1, б) и более значительно при $L_c = 150$ мкм (рис. 1, в). Однако следует отметить, что при направлениях скрайбирования $\alpha = 15^\circ$ и 30° зависимость $N_{об} = f(V)$ при различной длине скрайбирования имеет иной характер, т. е. результаты исследования свидетельствуют о существовании зависимости $N_{об}$ от направления скрайбирования. Подробный анализ зависимости $N_{об} = f(\alpha)$ рассматривается в отдельной работе. Здесь же следует отметить, что результаты исследований подтверждают тот факт, что при скрайбировании на активность процесса двойникования влияет ориентационный фактор, который определяется взаимной ориентацией направления деформирования и плоскостей двойникования, а также энергетический фактор, который определяет характер

конкурирующих механизмов деформации – скольжения и двойникового. В то же время вид кривых (рис. 1), их близкое к эквидистантному расположение иллюстрирует малую значимость совместного влияния факторов V и P , что определяется сравнительно небольшим коэффициентом регрессии при парном произведении факторов. То есть в качестве энергетического источника двойникового при скрайбировании выступает преимущественно тот и (или) другой фактор независимо друг от друга.

Исследования В.А. Федорова и сотрудников показали [13–15], что при различных видах деформирования в изучаемом интервале скоростей при комнатной температуре количество двойников возрастает с увеличением скорости деформирования. Авторы утверждают, что при малых скоростях деформирования зародыши двойникового диссоциируют на скользящие дислокации, тогда как при больших скоростях деформирования релаксация напряженного состояния происходит преимущественно двойникованием, так как мал промежуток времени деформирования в сравнении с инкубационным периодом активации диссоциации зародыша двойника [15].

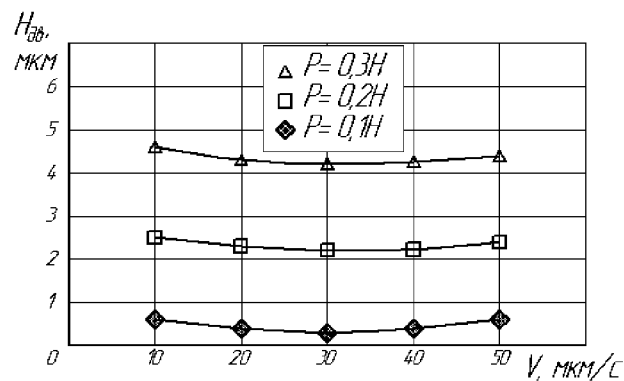
Характерной особенностью двойникового при скрайбировании является образование серповидных двойников вдоль границ царапины [9]. Искривление двойников обусловлено особенностями напряженно-деформированного состояния вдоль границ царапины, созданного движущимся индентором. В выполненных исследованиях деформацию образцов осуществляли в условиях, когда при образовании царапин “заведомо преобладали процессы пластической деформации, а не разрушения” [16]. С увеличением нагрузки на индентор и длины скрайбирования в кристалле возникают механические напряжения, под действием которых пластическая деформация приводит к искривлению плоскостей двойникового. Поэтому зарождение двойникового дислокаций и их распространение в области, прилегающей к границам царапины, происходит в условиях искаженной кристаллической решетки по искривленным кристаллографическим направлениям. В результате в области взаимодействия двойников с пластически деформированными областями материала наблюдаются существенные особенности формы двойников [4], выражающиеся в искривлении двойниковых границ, вызванном деформацией кристаллической решетки.

В работе [17] отмечается явление механического двойникового как вероятный механизм пластической деформации, осуществляющий развороты кристаллической структуры. А так как двойникование является “одним из самых радикальных и оптимальных способов снятия напряжений”, то оно приводит к такому развороту структуры, при котором происходит накопление напряжений, которые способствуют периодическому повторению процесса двойникового. В результате происходит изменение количественных характеристик двойникового. Образование деформированных областей – первопричина зарождения двойников, и такой причиной может быть состояние дефектной структуры в объеме воздействия концентрированного напряжения [12].

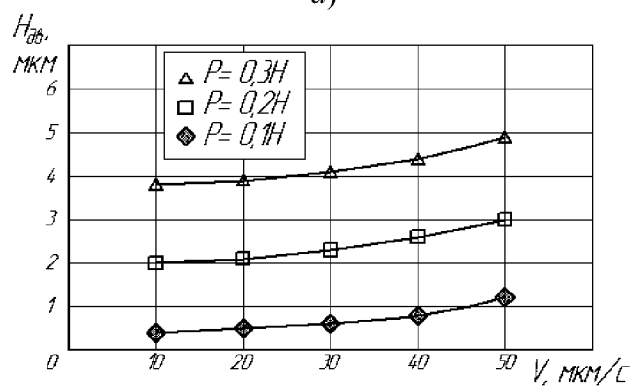
Увеличение длины скрайбирования в сочетании с увеличением скорости приводит к повышению интенсивности пластической деформации, что способствует накоплению упругой энергии в материале за счет генерации дефектов кристаллического строения. Накопленная упругая энергия преобразуется в поверхностную энергию новых границ и вызывает образование двойниковых ансамблей вдоль границ царапины. При небольшой скорости скрайбирования (до 10–20 мкм/с) увеличение длины скрайбирования приводит к незначительному увеличению числа двойников, и существенный рост двойников отмечается с возрастанием скорости V до 40–50 мкм/с при L_c больше 100 мкм (рис. 1, б и в). По-видимому, рост числа двойников свидетельствует о пластифицирующем действии фактора [17], в данном случае, скорости скрайбирования.

В исследуемом интервале скоростей и нагрузок отсутствует экстремум функций. То есть в данных условиях у двойникового нет конкурирующих процессов, в частности, скольжения, и двойникование протекает более активно. При более энергетических условиях скрайбирования (увеличение скорости и нагрузки), когда энергии деформирования достаточно для активирования скольжения, возможно блокирование последним источников двойникового дислокаций [18]. Следует ожидать, что увеличение числа двойников начнет замедляться, когда напряжения в области царапины достигнут величин, при которых преобладающее значение будут иметь процессы скольжения и разрушения границ царапины, а не пластическая деформация. Тогда возможно предположить появление экстремума функции $N_{oe} = f(V)$ при увеличении нагрузки P и смещение его на графике вправо.

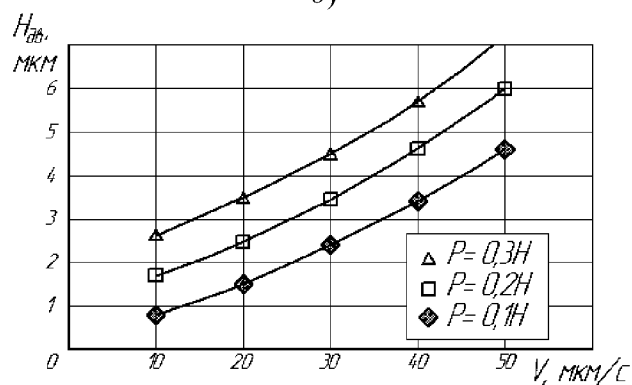
Зависимость средних значений толщины двойников $H_{об}$ от скорости скрайбирования при нагрузке на индентор P для различной длины скрайбирования L_c представлены на рис. 2. Прежде всего следует отметить практически эквидистантное расположение графиков $H_{об} = f(V)$ при различных значениях P для конкретной длины скрайбирования, что свидетельствует о малой значимости совместного влияния P и V на интенсивность образования двойников в пределах исследуемых значений факторов.



а)



б)

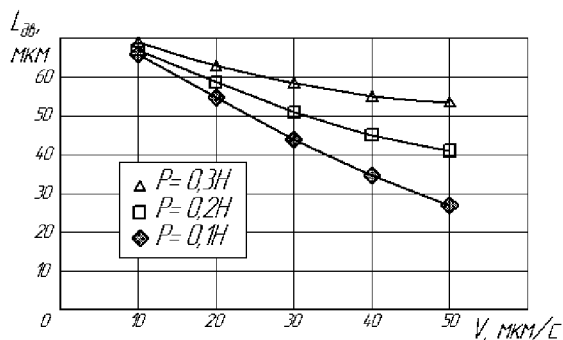


в)

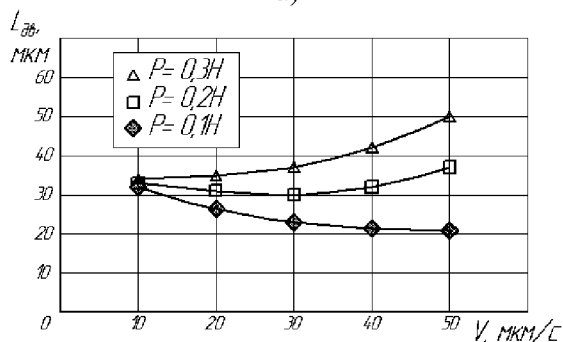
Рис. 2. Зависимость толщины двойников у устья $H_{об}$ от скорости скрайбирования (обозначения – см. рис. 1)

Начальные значения графиков при одних и тех же значениях P для различной длины скрайбирования L_c лежат практически на одном и том же уровне (см. рис. 2, а, б, в), т. е. при минимальной скорости скрайбирования ($V = 10$ мкм/с) толщина двойников зависит только от нагрузки на индентор. Это свидетельствует о квазистатических условиях скрайбирования, соответствующих напряженно-деформационному состоянию в условиях статического вдавливания индентора.

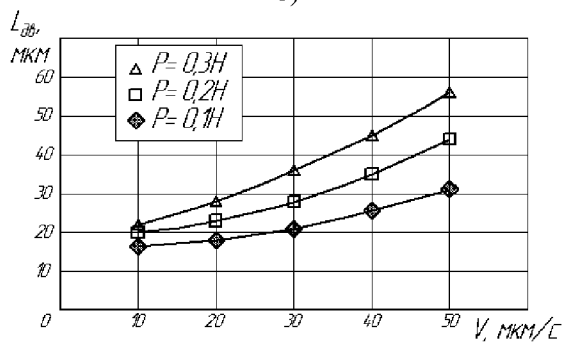
При небольшой длине L_c скорость скрайбирования практически не влияет на средние значения толщины двойников $H_{об}$ (рис. 2, а), хотя количество двойников при V более 30 мкм/с начинает увеличиваться (см. рис. 1, а). При $L_c = 100$ мкм/с толщина двойников $H_{об}$ несколько возрастает с увеличением V (рис. 2, б), но медленнее, чем увеличивается общее количество двойников $N_{об}$ (см. рис. 1, б), и быстрое увеличение $H_{об}$ (аналогично $N_{об}$) наблюдается при длине скрайбирования $L_c = 150$ мкм/с (см. рис. 1, в и 2, в).



а)



б)



в)

Рис. 3. Зависимость длины двойников $L_{об}$ от скорости скрайбирования (обозначения – см. рис. 1)

Некоторые соображения по объяснению установленных зависимостей изложены выше при анализе зависимостей $N_{oe} = f(V)$. При этом определенно установлено, что для всех условий скрайбирования двойники имеют большую толщину при увеличении нагрузки на индентор. Интенсификация внешнего воздействия, повышение скорости скрайбирования, увеличение длины скрайбирования и нагрузки на индентор стимулирует работу источников двойникообразующих дислокаций. Увеличение плотности двойникообразующих дислокаций ведет к увеличению степени некогерентности границ, проявляющемся в увеличении толщины двойников N_{oe} [4]. В работе [17] также отмечается, что увеличение толщины двойников свидетельствует об увеличении количества двойникообразующих дислокаций.

В отличие от графиков зависимостей $N_{oe} = f(V)$ и $H_{oe} = f(V)$, которые имеют сравнительно схожий вид, зависимости средних значений длины двойников L_{oe} от скорости скрайбирования имеют существенно иной характер изменения (рис. 3). Практически зависимости $L_{oe} = f(V)$ представляют графики в виде так называемого “веера” с общим полюсом [13]. Величина координат полюса показывает, что при квазистатических условиях скрайбирования средняя длина двойников имеет близкие значения при различной величине нагрузки P и уменьшается с увеличением длины скрайбирования, что объясняется интенсификацией напряженно-деформированного состояния вблизи границ царапины (см. рис. 1, а, б, в). Далее с увеличением скорости скрайбирования V наблюдается тенденция уменьшения L_{oe} для $L_c = 50$ мкм, стабилизации L_{oe} для $L_c = 100$ мкм и увеличения L_{oe} для $L_c = 150$ мкм. При этом происходит расхождение “веера” кривых и большие значения L_{oe} наблюдаются при увеличении нагрузки P .

Таким образом, изменение геометрических размеров двойников $H_{oe} = f(V)$ и $L_{oe} = f(V)$ с изменением исследуемых факторов скрайбирования представляют сложные неоднозначные зависимости. При определенных условиях скрайбирования возможно уменьшение средней толщины двойников у устья H_{oe} при увеличении L_{oe} или уменьшение среднего значения длины двойников L_{oe} с увеличением их толщины H_{oe} , а также другие сочетания геометрических параметров двойников. Однако в целом все же можно отметить тенденцию пропорционального изменения размеров двойников не только с увеличением нагрузки, что отмечалось в работе [1], но также и с увеличением скорости скрайбирования. А увеличение внешней нагрузки приводит к увеличению не только количества (см. рис. 1), но и линейных размеров двойников, что также наблюдалось в работе [12].

На рис. 4 представлены графики зависимости параметра $H_{oe} / L_{oe} = f(V)$, характеризующего некогерентность двойников. Степень некогерентности двойниковых границ η является важным параметром, определяющим уровень внутренних напряжений на границе двойника. В целом степень некогерентности двойниковых границ с увеличением скорости скрайбирования V и нагрузки на индентор P имеет тенденцию увеличения. Однако для небольшой длины скрайбирования ($L_c = 50$ мкм) увеличение зависимости $\eta = f(V)$ практически незначимо, его можно считать в пределах погрешности эксперимента. Это соответствует заметному уменьшению средних значений длины двойников L_{oe} с увеличением V (см. рис. 3, а) при практически постоянном значении H_{oe} (см. рис. 2, а). Для $L_c = 100$ мкм с увеличением скорости V отношение H_{oe} / L_{oe} несколько уменьшается при $P = 0,3$ Н, остается практически постоянным при $P = 0,2$ Н и возрастает при $P = 0,1$ Н, т. е. в общем зависимость $\eta = f(V)$ с изменением нагрузки имеет сложную неоднозначную характеристику. Такая же неоднозначная зависимость при той же длине скрайбирования наблюдается и для $L_{oe} = f(V)$ (см. рис. 3, б) в отличие от зависимости $H_{oe} = f(V)$, которая имеет близкие к эквидистантным графики для различных значений P (рис. 2, б).

При больших длинах скрайбирования с увеличением скорости отмечается возрастание H_{oe} и L_{oe} , а так как рост толщины двойников опережает увеличение их длины, то соответственно увеличивается и параметр $\eta = H_{oe} / L_{oe} = f(V)$. Кроме того, для различных значений нагрузки P графики $\eta = f(V)$ стремятся к единому “полюсу” при $V \approx 50$ мкм/с (рис. 3, в), т. е. происходит схождение “веера” кривых. Отмеченная зависимость свидетельствует о том, что в районе координат полюса наблюдаются конкурирующие с двойникованием процессы, которые блокируют процесс зарождения двойников при $V \approx 50$ мкм/с, и образующиеся двойники имеют один и тот же уровень некогерентности при различной нагрузке P на индентор. В этом случае характер роста двойников при скрайбировании аналогичен отмечаемому в работе [1]: “С увеличением внешней концентрированной нагрузки размеры упругого клиновидного двойника растут непрерывно, плавно, пропорционально нагрузке, отношение h/L остается постоянным на протяжении всего роста”.

Однако, как свидетельствуют результаты выполненных исследований, при скрайбировании зависимость $\eta = f(V)$ имеет более сложный неоднозначный характер изменения и отношение H_{0e} / L_{0e} не остается постоянным с изменением условий скрайбирования. Изменение размеров двойников, утолщение двойниковой прослойки (H_{0e} / L_{0e}), различие плотности двойникообразующих дислокаций и других эффектов связаны с изменением структурного состояния материала под воздействием внешнего напряжения в условиях деформирования материала путем скрайбирования. А так как при скрайбировании двойники вдоль царапины образуются, как правило, группами [9, 10], то развитие двойников происходит в условиях взаимодействия с другими скоплениями двойникообразующих дислокаций соседних двойников. И такое взаимодействие усиливается при увеличении внешних напряжений с повышением нагрузки и скорости скрайбирования.

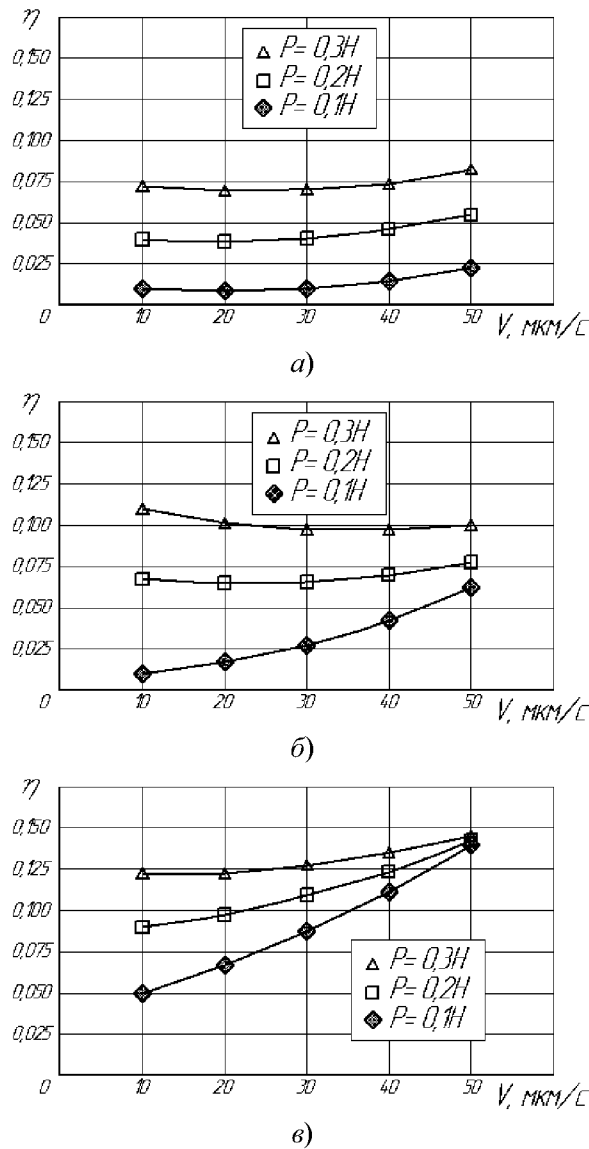


Рис. 4. Зависимость степени некогерентности двойников η от скорости скрайбирования (обозначения – см. рис. 1)

Заклучение

В целом результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Дислокационная теория упругого двойникового кристаллов применима для количественного анализа закономерностей образования двойников при деформировании поверхности материала путем скрайбирования.

2. Количественный анализ механического двойникового при скрайбировании представляет определенные сложности из-за значительного статистического разброса параметров образования двойников и их изменения с изменением напряженно-деформированного состояния материала.

3. На количественные характеристики образования двойников оказывает влияние ряд факторов: скорость скрайбирования, нагрузка на индентор и длина скрайбирования. Установлены средние статистические характеристики двойникового в зависимости от скорости образования царапины при различной нагрузке на индентор и длине скрайбирования.

4. При сложной неоднозначной характеристике образования двойников при скрайбировании отмечается общая тенденция увеличения количества двойников, их геометрических параметров и степени некогерентности с увеличением скорости скрайбирования и нагрузки на индентор.

Авторы благодарят В.С. Мурашко за помощь в компьютерной обработке результатов эксперимента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Классен-Неклюдова, М. В.** Механическое двойникование кристаллов / М. В. Классен-Неклюдова – Москва : Изд-во АН СССР, 1960. – 261 с.
2. **Бойко, В. С.** Обратимая пластичность кристаллов / В. С. Бойко, Р. И. Гарбер, А. М. Косевич. – Москва : Наука, 1991.
3. **Федоров, В. А.** Дислокационные механизмы разрушения двойникоующихся материалов / В. А. Федоров, Ю. И. Тялин, В. А. Тяпина. – Москва : Издательство Машиностроение-1, 2004. – 336 с.
4. **Остриков, О. М.** Механика двойникового твердых тел / О. М. Остриков. – Гомель : ГТТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.
5. **Владимиров, В. И.** Физическая природа разрушения металлов / В. И. Владимиров. – Москва : Металлургия, 1984. – 280 с.
6. **Финкель, В. М.** Физика разрушения / В. М. Финкель. – Москва : Металлургия, 1970. – 367 с.
7. **Глезер, А. М.** Принципы создания многофункциональных конструкционных материалов нового поколения / А. М. Глезер // Актуальные проблемы прочности: сборник тезисов LVII Междунар. конф., Севастополь, 24–27 мая 2016 г. – Севастополь, 2016. – С. 3.
8. **Полянский, В. А.** Пределы оценки механических характеристик материалов / В. А. Полянский, А. М. Полянский, Ю. А. Яковлев // Фазовые превращения и прочность кристаллов : сборник тезисов Девятой Международной конференции, Черногловка, 7–11 ноября 2016 г. – Черногловка, 2016. – С. 166.
9. **Кульгейко, Н. М.** Особенности двойникового монокристалла висмута при скрайбировании его поверхности (111) индентором Виккерса / Н. М. Кульгейко, О. М. Остриков // Вестник ГТТУ им. П. О. Сухого. – 2015. – № 2 (61). – С. 42–50.
10. **Кульгейко, Н. М.** Закономерности образования двойников у границ царапины при скрайбировании поверхности (111) монокристалла висмута индентором Виккерса / Н. М. Кульгейко, О. М. Остриков // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. – 2016. – № 1(47). – С. 74–81.
11. **Яцерицын, П. И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Яцерицын, Е. И. Махаринский. – Минск : Выш. школа, 1985. – 286 с.
12. **Камышанченко, Н. В.** Исследование динамики двойникового в титане ВТ1-0 методом акустической эмиссии / Н. В. Камышанченко, И. С. Никулин, М. С. Кунгурцев // Перспективные материалы. – 2010. – № 5. – С. 93–98.
13. **Федоров, В. А.** Влияние температуры и скорости нагружения на двойникование поликристаллического ОЦК сплава Fe +3,25% Si / В. А. Федоров, С. Н. Плужников // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12–14 марта 2003 г. : сборник тезисов. – СПб., 2003. – 280 с. – С. 206–207.

14. Двойникование, сопутствующее разрушению поликристаллического ОЦК сплава Fe +3,25% Si / В. А. Федоров [и др.] // Актуальные проблемы прочности : сборник тезисов XLIV Международной конференции (3–7 октября 2005г., Вологда). – Вологда, 2005. – 232 с. – С. 11.
15. Характеристики двойникования, сопутствующего разрушению ОЦК сплава Fe +3,25% Si / В. А. Федоров [и др.] // XVI Петербургские чтения по проблемам прочности. – Санкт-Петербург, 14–16 марта 2006 г. : сборник тезисов. – СПб., 2006. – 254 с. – С. 27.
16. Роль двойникования в процессах пластической деформации / М. Ш. Акчурина [и др.] // Кристаллография. – 2010, том 55, № 4. – С. 663–668.
17. Пинчук, А. И. Двойникование в кристаллах сурьмы в условиях воздействия сосредоточенной нагрузки и постоянного магнитного поля / А. И. Пинчук, С. Г. Слесарев // XVI Петербургские чтения по проблемам прочности : сборник тезисов, Санкт-Петербург, 14–16 марта 2006 г. – СПб., 2006. – С. 120.
18. **Остриков, О. М.** Закономерности механического двойникования мартенситной фазы монокристалла Ni₂MnGa при деформировании его поверхности (100) пирамидой Виккерса / О. М. Остриков, Е. В. Шматов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухова. – 2013. – № 3. – С. 37–42.

Поступила в редакцию 20.04.2018 г.

Контакты: omostrikov@mail.ru (Остриков Олег Михайлович)

Simanovich N., Ostrikov O., Kulgeiko M. THE IMPACT OF SCRIBING SPEED ON THE FORMATION OF BISMUTH SINGLE CRYSTAL TWINS.

With the help of the method of scribing surfaces with a diamond indenter average statistical characteristics of twinning are defined regarding the speed of scribing with different loads on the indenter and scribing length. The general tendency of the increasing number of twins, their geometrical parameters and the degree of incoherent twin boundaries with the growing speed of scribing and indenter loading is revealed.

Keywords: mechanical twinning, scribing, bismuth.