

С. Д. Шаврей

## ОСОБЕННОСТИ ДВОЙНИКОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВИСМУТА В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В последнее время возрос интерес к изучению влияния внешних энергетических воздействий на пластическую деформацию различных материалов. Одним из видов немеханического воздействия на материал является магнитное поле (МП), влияние которого на пластическую деформацию различных материалов получило название магнитопластический эффект (МПЭ). В значительной степени это явление изучено для ионных кристаллов, полупроводников и металлов, где пластическая деформация осуществляется скольжением [1–9]. Большинство исследователей склоняется к выводу, что слабое МП создает условия для открепления дислокаций от локальных магниточувствительных дефектов, а дальнейшее их движение обуславливается полями дальнедействующих внутренних напряжений кристалла. Несмотря на значительное число публикаций по данной проблематике, влияние МП на пластическую деформацию часто подвергается сомнению.

На этом фоне практически не изученным остается вопрос магниточувствительности такого важнейшего вида кристаллографического формоизменения, как двойникование. Важным фактором, определяющим несомненную актуальность исследований в данной области, является то, что скольжение и двойникование являются взаимосвязанными процессами. Это дает возможность изучать влияние МП на оба процесса одновременно. Кроме этого экспериментальное изучение воздействия МП на металлы, где пластическая деформация реализуется перемещением как полных, так и частичных дислокаций, может способствовать углублению представлений о физических механизмах МПЭ.

Трудности управления пластической деформацией двойникованием сдерживают применение некоторых технически перспективных материалов, таких как Ti, Be, Zn, сплавов на их основе, поэтому изучение особенностей двойникования кристаллов в МП целесообразно с точки зрения практического применения исследуемого явления для разработки новых возможностей и способов управления физико-механическими свойствами двойникующихся материалов, а также для прогнозирования поведения таких материалов при эксплуатации в условиях наложения МП. Как показывают многочисленные исследования определяющее влияние на эксплуатационные характеристики оказывает структура и свойства поверхностных слоев материала и непосредственно качество поверхности. В связи с этим изучение характеристик, позволяющих судить

о структурном состоянии и свойствах локальных объемов материала в поверхностных слоях с помощью метода микроиндентирования, используемого в данной работе, имеет практическое значение.

Удобным материалом для изучения пластической деформации двойникованием является висмут. Монокристаллические образцы висмута химической чистоты 99,97% имели форму прямоугольных призм и размеры  $5 \times 5 \times 15$  мм. Для достижения однородности МП образцы закреплялись с помощью специального устройства, изготовленного из неферромагнитных металлов, в геометрическом центре сердечника электромагнита на высоте 10 см от стального столика микротвердомера ПМТ-3. Непосредственные измерения, выполненные с помощью датчика Холла, показали, что неоднородность МП вдоль образца не превышала 2%. С целью устранения инструментальных эффектов стальные детали ПМТ-3, находившиеся в МП (оправка стандартной пирамиды Виккерса, грузы на штоке индентора) заменялись деталями, изготовленными из неферромагнитных металлов. Сосредоточенная нагрузка прикладывалась перпендикулярно свежесколотой плоскости спайности (111) кристаллов висмута. При таком способе нагружения возникают линзовидные двойники системы  $\{110\}\langle 001 \rangle$ , которые легко прорастают вглубь кристалла под действием внешней силы и при выходе на свободную поверхность имеют форму клина. Усреднение проводилось по результатам измерений размеров двойников не менее 20 отпечатков.

В работе [10] впервые обнаружено, что комбинированное приложение МП и сосредоточенной нагрузки приводит к частичному падению размеров двойников и снижению их количества вокруг отпечатка. Приложение и отключение МП после микроиндентирования не меняет картину пластической деформации двойникованием. Эффект магниточувствительности двойникования кристаллов висмута, который заключается в уменьшении размеров двойников и снижении их числа, наблюдался в том случае, когда МП и сосредоточенная нагрузка одновременно прилагались к образцу. Обращение знака поля не вносило изменений в результат пластической деформации двойникованием.

Сравнительный анализ показал, что длина двойников в присутствии МП существенно меньше, чем без поля. Этот факт свидетельствует об уменьшении среднего пробега двойниующих дислокаций при приложении МП к образцу. В интервале времени  $t = 0,1-5$  часа воздействие сосредоточенной нагрузки практически не изменяет длину двойников  $L$  как при приложении МП, так и без него, т. е. средний пробег двойниующих дислокаций не зависит от времени воздействия сосредоточенной нагрузки. В то же время размножение двойниующих дислокаций не прекращается, о чем свидетельствует экспериментальный

факт увеличения ширины  $h$  клиновидных двойников у устья. При этом приложение МП заметно подавляет этот процесс [11, 12].

Изучение зависимости размеров двойников, образованных воздействием сосредоточенной нагрузки в течение  $t = 5$  мин при изменении веса груза на штоке индентора в диапазоне  $P = 0,09-0,3$  Н без поля и при наложении МП с индукцией  $B = 0,2$  Тл на образцы монокристаллов висмута, показало, что длина и ширина двойников линейно зависит от нагрузки как в МП, так и без него. Установлено, что снижение среднего пробега двойникующих дислокаций в МП не зависит от нагрузки. Число двойникующих дислокаций  $n$ , локализованных на границе раздела двойник – материнский кристалл, с увеличением нагрузки увеличивается, при этом в МП  $n$  значительно меньше [13].

Обнаружена чувствительность микротвердости  $H$  монокристаллов висмута к приложению МП. При этом  $H$  слабо зависит от нагрузки. Без приложения МП к образцу  $H$  несколько увеличивается с ростом  $P$ . Это находится в качественном согласии с законом Мейера [11]. Приложение МП ведет к тому, что  $H$  монокристаллов висмута при малых  $P$  увеличивается до 10%. В присутствии МП  $H$  уменьшается при увеличении  $P$  и в области больших нагрузок сравнивается с величиной микротвердости без приложения МП, что указывает на поверхностный характер наблюдаемого эффекта в монокристаллах висмута. Увеличение  $H$  в МП сопровождается снижением подвижности двойникующих дислокаций  $\gamma$  при малых нагрузках. При увеличении нагрузки  $H$  без МП несколько увеличивается, а  $\gamma$  снижается, т. е. наблюдается вполне закономерная корреляция. В то же время при наличии МП и микротвердость, и подвижность снижаются при увеличении нагрузки. Следовательно, сделать однозначный вывод о том, что подвижность дислокаций отвечает за изменение микротвердости в МП нельзя. Можно предположить, что увеличение  $H$  происходит за счет взаимного пересечения дислокаций различных систем скольжения при стимулирующем действии МП. Если этот эффект имеет поверхностный характер, то при увеличении нагрузки, т. е. при более глубоком проникновении индентора в кристалл, уменьшение  $H$  можно связать с интенсификацией процессов размножения дислокаций и поперечного скольжения.

В [14] получено, что для кристаллов висмута существует пороговое значение МП с индукцией  $B_0 \approx 0,1$  Тл, по достижению которого средние размеры двойников начинают уменьшаться. При  $B > 0,2$  Тл  $L$  практически не изменяется, что свидетельствует о насыщении наблюдаемого эффекта.

Учитывая взаимосвязь двойникования и скольжения в [15], удалось выявить различие в размерах дислокационной розетки, возникающей вокруг отпечатка индентора и состоящей из рядов полных дислокаций

скольжения с полем и без него. Приложение МП существенно увеличивает размеры упрочненных областей поверхности кристалла (размеры дислокационной розетки, образованной скольжением). Кроме этого, опытные данные, полученные методом избирательного травления, указывают на то, что приложение МП стимулирует работу всех плоскостей скольжения. Возникающее в результате этого деформационное упрочнение объясняет тот факт, что микротвердость не уменьшается при имеющей место пластификации скольжением в МП.

В [16] проведена сравнительная оценка величины объемной упругой энергии двойников  $W_v$  и поверхностной энергии двойниковых границ  $W_s$  в МП и без приложения МП. Получено, что  $W_v$  обнаруживает рост, как без поля, так и в присутствии МП, и испытывает тенденцию к насыщению с увеличением времени выдержки кристалла под нагрузкой. Причиной роста  $W_v$  является размножение двойникующих дислокаций при неизменной длине их пробега, что приводит к уменьшению междислокационного расстояния. Последнее является причиной и того, что приложение МП не изменяет  $W_v$  при значительном падении удвойникового объема. Поверхностная энергия двойниковых границ  $W_s$  заметно меньше в присутствии МП по причине снижения площади межфазной границы раздела двойник – материнский кристалл. Из сравнения численных значений замечено, что  $W_v$  на два порядка превышает  $W_s$ . Это означает, что большая часть работы внешних сил при двойниковании идет на упругую деформацию. Поэтому можно заключить, что приложение МП при изменении геометрических параметров двойникования практически не меняет энергию системы двойник – материнский кристалл. Иными словами энергетический баланс в условиях МПЭ при двойниковании сохраняется. Некоторое уменьшение поверхностной энергии границы двойника, возможно, связано с преодолением периодического потенциального рельефа Пайерлса (силы сухого трения) каждой двойникующей дислокацией при обратном ее движении.

Обсуждая природу наблюдаемого эффекта частичного подавления двойникования приложением МП, прежде всего, необходимо учесть явление магнитострикции. На это указывает неизменность картины двойникования при изменении направления МП, т. к. магнитострикция относится к четным эффектам. С другой стороны, магнитострикция в однородном МП, подобно тепловому расширению, может привести свободный кристалл лишь к изменению его размеров. Напряжения возникают в неоднородном поле. При этом деформации, имеющие магнитострикционную природу, в диамагнитных материалах, к которым относится висмут, могут достигать только величины порядка  $10^{-6}$  (магнитная восприимчивость  $\chi = -1,5 \cdot 10^{-6}$ ). Это заметно меньше значения деформации начала размножения дислокаций ( $4 \cdot 10^{-4}$ ) и значения деформации отрыва дислокационных сегментов

от стопоров ( $8 \cdot 10^{-5}$ ). Немаловажным является и то, что величина магнитострикционного напряжения с ростом индукции МП должна увеличиваться, в то время как в работе [14] получено, что при увеличении индукции МП наблюдается насыщение эффекта частичного подавления двойникового приложением постоянного МП. Следует отметить то, что в случае действия магнитострикционного механизма снятие МП приводило бы к восстановлению картины двойникового до значения без воздействия МП. Тот факт, что без нагрузки МП не меняет картину пластической деформации двойникованием, также свидетельствует не в пользу магнитострикционного механизма. Аналогичные выводы относительно влияния МП на пластическую деформацию диамагнитных металлов Zn, Cu, Ag сделаны в [17, 18, 19]. Таким образом, эффект частичного подавления двойникового приложением постоянного МП нельзя отнести к изменениям магнитострикционного происхождения.

Как было показано выше, магниточувствительность пластической деформации двойникованием монокристаллов висмута выражается в падении средних размеров двойников при приложении МП. Поскольку двойникование и скольжение являются конкурирующими видами пластической деформации, логично предположить, что повышение интенсивности скольжения может привести к частичному подавлению двойникового. В пользу такой точки зрения говорит тот факт, что скольжение – процесс инерционный, а двойникование – скачкообразный. Как показал эксперимент, при воздействии МП в течение  $t = 0,3$  мин средняя длина двойников практически совпадает со средней длиной двойников без приложения МП (рисунок 1). Дальнейшее увеличение выдержки кристалла под нагрузкой в МП ( $t = 0,3-1,5$  мин.) приводит к плавному уменьшению средней длины двойников. Скорость перемещения конца двойника по порядку величины совпадает со скоростью двойникового монокристаллов висмута, полученной в [20] при изучении температурной зависимости этого процесса. Кроме этого, в [21] при изучении зависимости двойникового от скорости деформирования сосредоточенной нагрузкой получено, что при  $\dot{\epsilon} = 10$  мН/с двойники вообще не развиваются и деформация реализуется преимущественно скольжением. В течение последующего времени выдержки кристалла под воздействием сосредоточенной нагрузки вплоть до 5 часов средняя длина двойников постоянна [11]. Картина пластической деформации скольжением в этом случае также остается стабильной.

С целью выяснения возможных причин частичного подавления двойникового активизирующимся в МП скольжением следует рассмотреть схему пластического течения материала при формировании отпечатка. Деформация в этом случае осуществляется двумя способами:

вмятием материала вглубь и его выдавливанием вверх, благодаря чему вокруг отпечатка индентора образуются навалы. По мере углубления в кристалл двойники уменьшаются и ограниченные области заполняются дислокациями. Движение же полных дислокаций вдоль «навалых» плоскостей, по которым происходит вынос материала на поверхность, при низких температурах затруднено скоплениями двойникующих дислокаций, которые представляют собой границы раздела в кристалле. В результате взаимодействия через упругие поля дислокации матрицы будут как бы «вытесняться» движущейся двойниковой границей.

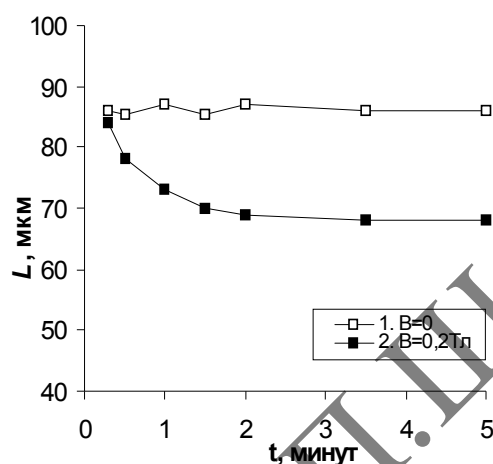


Рисунок 1 – Зависимость средней длины двойника  $L$  от времени воздействия  $t$  сосредоточенной нагрузки

В нашем случае ситуация обратная. Двойники, которые на первой фазе своего развития распространяются со скоростью звука [22], уже полностью сформированы до начала реализации скольжения, которое является инерционным процессом. Петли полных дислокаций, лежащих в «навалых» плоскостях, испытывают торможение как со стороны точечных дефектов, так и со стороны скоплений двойникующих дислокаций, краевые компоненты которых при движении двойниковой границы движутся вглубь кристалла. Приложение МП отключает парамагнитные стопоры для дислокаций скольжения. Это приводит к увеличению мощности дислокационных скоплений в «навалых» плоскостях. За счет воздействия индентора концентрация упругих напряжений в головах этих скоплений возрастает, и они движутся к поверхности кристалла, преодолевая упругие отталкивания скоплений двойникующих дислокаций. Очевидно, что в этом случае двойники испытывают «отжатию» упругими полями, что ведет к движению двойникующих дислокаций в обратном направлении и захлопыванию некоторого числа петель двойникующих дислокаций. Иначе говоря, длины двойников и их ширина уменьшаются.

Двойникующие дислокации, по-видимому, в меньшей степени испытывают пластифицирующее влияние МП. В пользу такой точки зрения свидетельствует тот факт, что вектор Бюргерса частичных двойникующих дислокаций в кристаллах висмута равен всего  $b = \frac{1}{12}a$ , где  $a$  – параметр кристаллической решетки [22]. Кроме этого, там нет разорванных межатомных связей. Поэтому в ядрах двойникующих дислокаций имеется меньшее количество парамагнитных центров по сравнению с полными дислокациями. Но полностью исключить чувствительность двойникующих дислокаций к МП нельзя, т. к. при своем движении они взаимодействуют с полными, в результате чего на двойникующих дислокациях образуются ступеньки, являющиеся источниками точечных дефектов. Ступеньки, перегибы служат ловушками для электронов, что обеспечивает в этих случаях наличие в ядрах дислокаций парамагнитных центров.

Установление термодинамического равновесия двойника может быть одной из причин уменьшения его длины. При этом между механически и термодинамически равновесными длинами двойников следует проводить различия. Условие механического равновесия заключается в равенстве нулю суммы сил упругого и неупругого происхождения. Упругая сила действует на двойникующие дислокации со стороны внешнего поля и других дислокационных скоплений. Силы неупругого происхождения обусловлены следующими причинами. Любая дислокация при своем движении испытывает силу торможения подобно силе сухого трения. Сила Пайерлса существует даже в идеальном кристалле и обусловлена дискретностью решетки. Если кристалл дефектен, то существует сила сопротивления, обусловленная дефектами. Дефекты оказывают как непосредственное сопротивление преодолению их дислокациями, так и сопротивление за счет создаваемых ими упругих полей. Другой тип неупругих сил – сила поверхностного натяжения, действующая на двойникующую дислокацию со стороны материнского кристалла и равная нулю везде вне малой окрестности у кончика двойника [22].

Форма механически устойчивого двойника в момент его образования определяется исключительно условиями его возникновения, а не термодинамическим равновесием. При достаточно долгом существовании двойника к требованию механической устойчивости добавляется условие термодинамической устойчивости [23]. Из общих соображений ясно, что термодинамическое равновесие двойника наступает в том случае, когда поверхностная энергия двойниковой границы будет минимальна. При длительном воздействии сосредоточенной нагрузки двойник укорачивается и приобретает термодинамически равновесную форму

по мере преодоления силы сухого трения. За счет действия сил поверхностного натяжения двойникующие дислокации начинают обратное движение и останавливаются на более близких расстояниях от индентора. Как отмечается в [24], основным физическим механизмом в преодолении диссипативной силы Пайерлса (силы сухого трения) является перемещение термически активируемых перегибов на дислокациях. При таком механизме дислокации ожидают подходящих термических флуктуаций для преодоления точечных стопоров. По этой причине установление термодинамически равновесной длины двойника происходит в течение десятков часов. Повышение температуры кристалла ведет к дальнейшему укорачиванию двойника после того, как процесс установления его термодинамического равновесия считался завершенным.

В нашем случае приложение МП снижает длительность этого процесса до нескольких минут. Возможной причиной является то, что МП отключает магниточувствительные стопоры, препятствующие обратному движению двойникующих дислокаций. Разблокированная двойниковая граница получает возможность в течение более короткого времени принять термодинамически равновесную форму.

Известно [25], что изучение формы двойника позволяет экспериментально определить линейную плотность  $\rho(x)$  таких дислокаций вдоль длины двойника, совпадающей с направлением  $x$ . Толщина двойника в некоторой точке  $x$  очевидным образом связана с линейной плотностью двойникующих дислокаций соотношением

$$h(x) = a \int_x^L \rho(y) dy,$$

где  $a$  – параметр решетки в направлении, перпендикулярном плоскости двойникования,

$L$  – длина двойника.

Тогда линейную плотность двойникующих дислокаций можно найти из соотношения

$$\rho(x) = -\frac{1}{a} \frac{dh(x)}{dx}.$$

Следовательно, по измерениям толщины двойника  $h(x)$  можно определить значение функции  $\rho(x)$  в каждой точке вдоль длины двойника. Как и в [25], для построения экспериментальной зависимости  $\rho(x)$  использовались следующие последовательные действия: строился график зависимости  $h(x)$ , затем путем графического дифференцирования находилась производная в различных точках полученной кривой, далее умножением производной на коэффициент  $1/a$  находились значения линейной плотности. Полученный результат представлен на рисунке 2.



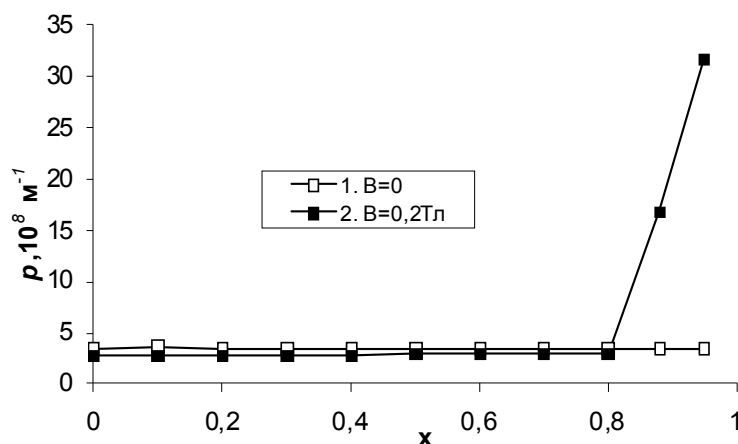
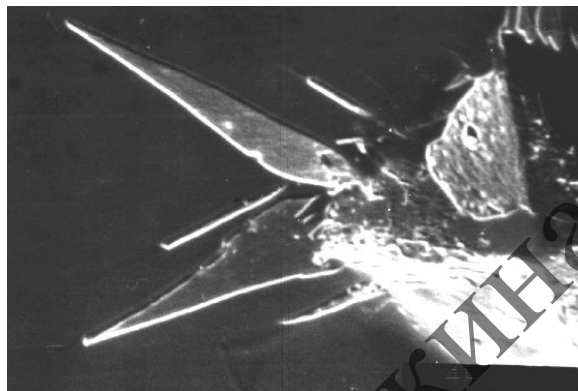
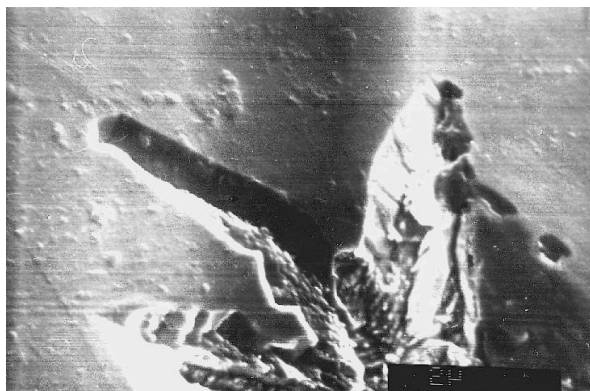


Рисунок 2 – Зависимость линейной плотности двойникующих дислокаций  $\rho(x)$  вдоль длины двойника,  $t = 5$  мин

Без приложения МП линейная плотность двойникующих дислокаций вдоль длины двойника равна  $\rho_0 = 3.5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}$ . На конце двойника, при  $x = L$ , она обращается в ноль, т. е.  $\rho(L) = 0$ . В МП численное значение линейной плотности меньше,  $\rho = 2.8 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}$ . При этом, как видно из рисунка 2, в интервале  $0.8L \leq x \leq L$  функция  $\rho(x)$  обнаруживает резкий рост и на порядок превышает численное значение  $\rho_0$ . В этом случае двойникующие дислокации движутся в обратную сторону. Доказательством этого является экспериментально полученное уменьшение длины клиновидных двойников.

Результаты электронно-микроскопических исследований образцов свидетельствуют в пользу приведенной выше точки зрения. По изменению геометрической формы двойников можно судить о характере протекающих дислокационных процессов. Как видно из микрофотографий на рисунке 3, в МП двойники имеют угол раствора намного больше (близко к  $180^\circ$ ), чем без поля. Возможно, этому способствует разблокирование контура двойника от стопоров парамагнитного типа. Уменьшение площади межфазной границы двойник – материнский кристалл соответствует его форме, когда угол при вершине двойника увеличивается, а его длина уменьшается. Такая форма двойника является термодинамически устойчивой [24]. Кроме этого, при изучении микрофотографий получено, что граница двойника в его конце значительно отклоняется от плоскости двойникования. Увеличенный наклон границы двойника обеспечивается ростом плотности двойникующих дислокаций на линии двойника.



а) –  $B = 0,2$  Тл,  $t = 5$  мин,  $P = 0,14$  Н      б) –  $B = 0$ ,  $t = 5$  мин,  $P = 0,14$  Н  
(увеличение 5000×)

**Рисунок 3 – Типичная форма двойников при микроиндентировании плоскости (111) монокристалла висмута**

#### Литература

1. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля / В.И. Альшиц [и др.] // ФТТ. – 1987. – Т. 29, № 2. – С. 467–471.
2. Исследование магнитоэластического эффекта в монокристаллах цинка / В.И. Альшиц [и др.] // Кристаллография. – 1990. – Т. 35, вып. 4. – С. 1014–1016.
3. Альшиц, В.И. «In situ» изучение магнитоэластического эффекта в кристаллах NaCl методом непрерывного травления / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик // ФТТ. – 1991. – Т. 33, № 10. – С. 3001–3010.
4. Альшиц, В.И. Магнитоэластический эффект в монокристаллах алюминия / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик // ФТТ. – 1992. – Т. 34, № 1. – С. 155–158.
5. Альшиц, В.И. Магнитоэластический эффект в кристаллах Cs и LiF / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик // ФТТ. – 1993. – Т. 35, № 2. – С. 320–323.
6. Орлов, А.М. Магнитоиндуцированное изменение независимости дислокаций в пластически деформированном кремнии n-типа / А.М. Орлов, А.А. Скворцов, Л.И. Гончар // ФТТ. – 2001. – Т. 43, вып. 7. – С. 1207–1210.
7. Магнитоэластический эффект в InSb / Е.В. Даринская [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 1999. – Т. 70, вып. 4. – С. 298–302.
8. Влияние слабых магнитных полей на динамику изменения микротвердости кремния, индуцируемых малоинтенсивным бета-облучением / Ю.И. Головин [и др.] // ФТТ. – 2007. – Т. 49, вып. 5. – С. 822–823.
9. Песчанская, Н.Н. Скачкообразная ползучесть при сжатии монокристаллов цинка в магнитном поле / Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман // ФТТ. – 2008. – Т. 50, вып. 6. – С. 997–1001.
10. Пинчук, А.И. Двойникование в кристаллах висмута при одновременном воздействии постоянного магнитного поля и сосредоточенной

нагрузки / А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей // *Металлофизика. Новейшие технологии.* – 2000. – Т. 22, № 12. – С. 43–46.

11. Пинчук, А.И. Магнитоэластический эффект в случае двойникования кристаллов висмута под воздействием сосредоточенной нагрузки / А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей // *ФТТ.* – 2001. – Т. 43, вып. 1. – С. 39–41.

12. Shavrey, S.D. A Decrease in the Mobility and Multiplication of Twinning Dislocations in Bismuth Crystals Exposed to Constant Magnetic Field / S.D. Shavrey, A.I. Pinchuk // *Technical Physics Letters.* – 2003. – Vol. 29, № 8. – P. 632–633.

13. Шаврей, С.Д. Влияние постоянного магнитного поля и сосредоточенной нагрузки на двойникование в кристаллах висмута / С.Д. Шаврей, А.И. Пинчук // *Машиностроение : Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып.18 / УП «Технопринт» ; под ред. И.П. Филонова.* – Минск, 2002. – С. 521–524.

14. Пинчук, А.И. Пороговый характер магнитоэластического эффекта при двойниковании в кристаллах висмута / А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей // *ФТТ.* – 2004. – Т. 46, вып. 9. – С. 1603–1604.

15. Влияние постоянного магнитного поля и механической нагрузки на скопления полных и частичных дислокаций в кристаллах висмута : Отчет о НИР / Мозырский гос. пед. ун-т ; рук. С.Д. Шаврей. – Мозырь, 2003. – 22 с. – № ГР 20031846.

16. Пинчук, А.И. Объемная упругая энергия двойников кристаллов висмута и поверхностная энергия границы раздела двойник-матрица в магнитном поле / А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей // *ФТТ.* – 2005. – Т. 47, вып. 11. – С.1964–1966.

17. Исследование магнитоэластического эффекта в монокристаллах цинка / В.И.Альшиц [и др.] // *Кристаллография.* – 1990. – Т. 35, вып. 4. – С. 1014–1016.

18. Абраимов, В.В. Влияние магнитного поля на низкотемпературную пластическую деформацию некоторых нормальных ГЦК металлов / В.В. Абраимов // *ФНТ.* – 1980. – Т. 6, № 10. – С. 1334–1343.

19. Дацко, О.И. Внутреннее трение в магнитообработанном материале с дислокациями / О.И. Дацко, В.И. Алексеенко // *ФТТ.* – 1997. – Т. 39, № 7. – С. 1234–1236.

20. Грабко, Д.З. Механические свойства полуметаллов типа висмута / Д.З. Грабко, Ю.С. Боярская, М.П. Дынту. – Кишинев : Штиинца, 1982. – 132 с.

21. Остриков, О.М. Влияние скорости нагружения на механизм пластической деформации в висмуте / О.М. Остриков, С.Н. Дуб // *ЖТФ.* – 2001. – Т. 71, вып. 5. – С. 44–46.

22. Косевич, А.М. Дислокационная теория упругого двойникования / А.М. Косевич, В.С. Бойко // *УФН.* – 1971. – Т. 104, вып. 2 – С. 201–255.

23. Лифшиц, И.М. О макроскопическом описании явления двойникования кристаллов / И.М. Лифшиц // *ЖЭТФ.* – 1948. – Т. 18, вып. 12. – С. 1134–1143.

24. Бойко, В.С. Силы трения и поверхностного натяжения двойниующих дислокаций / В.С. Бойко, Р.И. Гарбер, Л.Ф. Кривенко // *ФТТ.* – 1967. – Т. 9, вып. 2. – С. 435–443.

25. Солдатов, В.П. О равновесной форме двойника, затормозившего у препятствия / В.П. Солдатов, В.И. Старцев // *ДАН СССР.* – 1966. – Т. 166, вып. 3. – С. 588–591.