

Профессор Юлия Станиславовна Боярская – основатель научной школы физики прочности и пластичности в Молдове

Д. З. Грабко

*Институт прикладной физики,
г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, e-mail: grabco@phys.asm.md*



Профессор Юлия Станиславовна БОЯРСКАЯ (29.03.1928–15.01.1996) – создатель научной школы физика прочности и пластичности в Молдове, основатель и идеолог Лаборатории механических свойств материалов Института прикладной физики Академии наук Молдовы, преданно работавшая в течение многих лет для успешного развития данного научного направления.

Юлия Станиславовна родилась 29 марта 1928 года в г. Запорожье, Украина, в семье служащих. В 1951 году окончила с отличием физико-математический факультет Кишиневского государственного университета.



Рис. 1. Ю.С. Боярская – единственная женщина в коллективе кафедры физики Кишиневского госуниверситета. 1955 год.

Юлия Станиславовна принадлежала к первому выпуску Кишиневского госуниверситета, была очень способной, увлеченной студенткой. Еще в студенческие годы мечтала о научной работе и поступлении в аспирантуру (докторантуру).

Будучи аспиранткой Кишиневского государственного университета (1955–1958) заложила первый камень в фундамент исследований в области механических свойств кристаллов и физики прочности и пластичности.



Рис. 2. Юлия Станиславовна со своей первой аспиранткой – канд. ф.-м. наук М.И. Вальковской. 1965 год.



Рис. 3. Ю.С. Боярская и С.А. Москаленко – молодые супруги. 1951 год.

Кандидатскую (докторскую) диссертацию по физико-математическим наукам защитила в 1955 году, став первой женщиной в Молдове кандидатом (доктором) наук в области физики и матема-

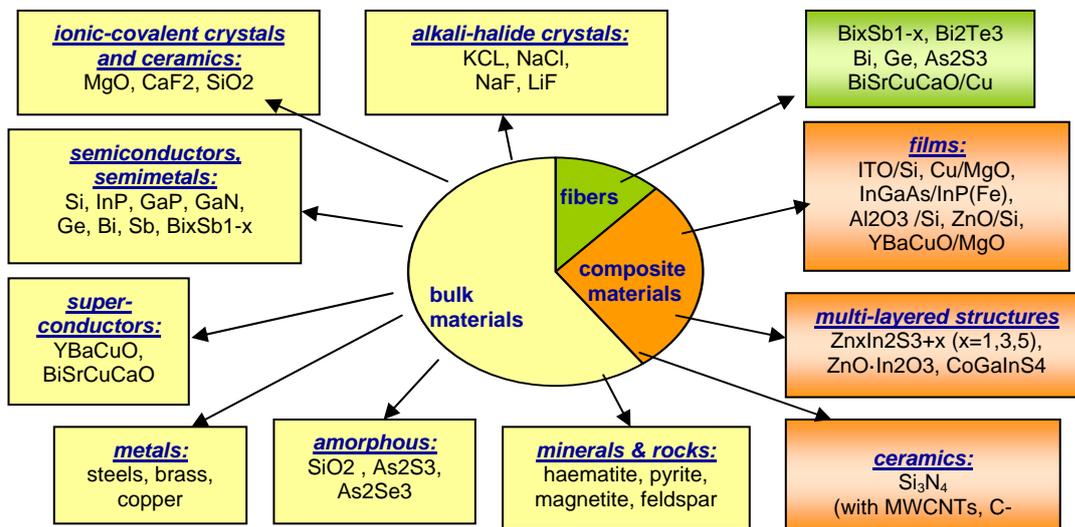


Рис. 4. Материалы, изучаемые в Лаборатории МСМ.

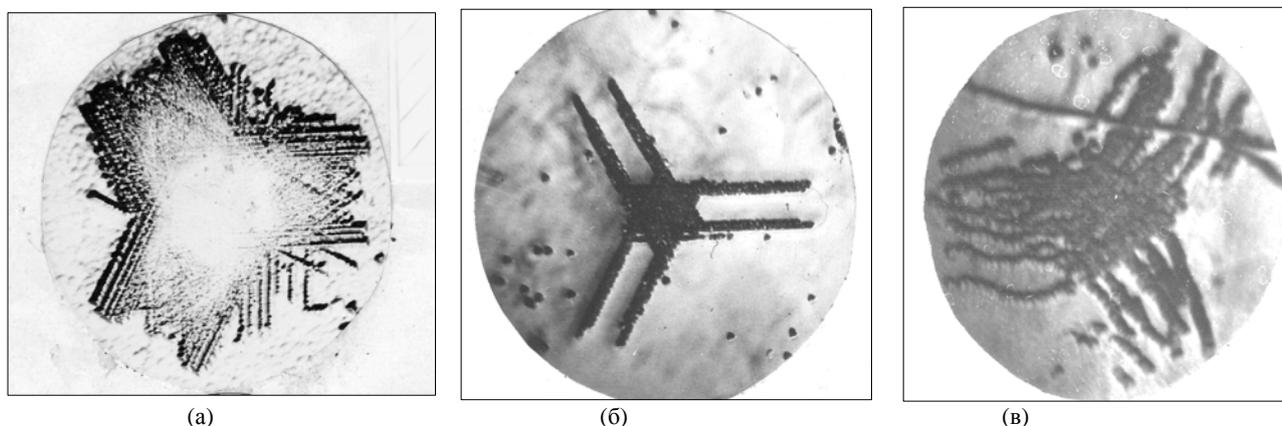


Рис. 5. Полярность пластической деформации, выявленная на грани (111) кристаллов NaCl, при индентировании в области разных температур. $T, ^\circ\text{K}$: (а) – 300; (б) – 77; (в) – 500. $\times 500$ [4].

тики (рис. 1, 2). Диссертацию доктора (доктора habilitat) физико-математических наук Юлия Станиславовна защитила в 1977 году, а в 1989 ей присвоено звание профессора.

Юлия Станиславовна прошла жизненный путь, рядом со своим мужем, академиком Святославом Анатольевичем Москаленко (рис. 3), также всецело преданным науке, известным в мировой физике ученым, одним из основателей научной школы в Молдове в области физики экситонов и нелинейной оптики.

Проф. Ю. С. Боярская посвятила всю свою жизнь науке – 10 лет в госуниверситете и 35 – в Академии наук Молдовы. Наиболее плодотворными стали годы работы в Институте прикладной физики АНМ. Исследования механических свойств широкого диапазона материалов дали возможность накопить огромный опыт. Среди изученных объектов – объемные кристаллы с ионным, ковалентным и смешанным типами связи, металлы и сплавы, кристаллические и аморфные полупроводники, тонкие нити полуметаллов и полупроводников, планарные структуры, высокотемпературные сверхпроводники, строительные материалы, минералы, горные породы и др. (рис. 4).

Выполненные исследования сыграли существенную роль в развитии и глубоком понимании многих важных и актуальных проблем физики прочности и пластичности. Выявлены и объяснены: упругое восстановление отпечатков после разгрузки [1, 2]; полярность пластической деформации материала с различным типом химической связи [3–5] (рис. 5); обратная пластическая деформация при микроиндентировании [4, 5]; аномальная подвижность дислокаций в области негетогенных напряжений [6]; влияние концентрации примеси на механические свойства кристаллов [3]; модификация пластических и хрупких свойств кристаллов при воздействии рентгеновского излучения и γ -радиации [7].

Обнаружение корреляции между механическими и другими физическими свойствами, исследование влияния различных внешних факторов (радиации, покрытий, легирования, температуры, давления) на модификацию этих свойств также являются очень важным направлением исследований. Было показано, что микроиндентирование – это один из наиболее удобных и многообещающих неразрушающих методов исследования, который позво-

ляет определить множество физических характеристик твердых тел, таких как: микротвердость, определенная квазистатическим индентированием (imprinting) (H), и склерометрическая (scratching) микротвердость (H_s), анизотропия твердости, микрохрупкость (γ), микропрочность (δ), коэффициент трещиностойкости (k_{lc}), подвижность дислокаций (I_e, I_s) и т.д.

Много новых физических явлений было выявлено и объяснено под руководством проф. Ю.С. Боярской. Среди них: подвижность дислокаций в широком интервале температур, дислокационный и межузельный механизмы пластической деформации, влияние концентрации примеси на механические свойства кристаллов и др.

В результате этих детальнейших и глубоких исследований Ю.С. Боярской в 1972 году была выпущена фундаментальная монография «Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость».

Были выявлены основные закономерности пластичности и хрупкости различных ионных, ионно-ковалентных, ковалентных кристаллов, полупроводников и полуметаллов. Предложены модели пластического течения материала при действии сосредоточенной нагрузки. Установлена корреляция между параметрами пластической деформации, возникающими при одноосном нагружении и при действии концентрированной нагрузки. Изданы также монографии: «Механические свойства полуметаллов типа висмута» (авторы: Д.З. Грабко, Ю.С. Боярская, М.П. Дынту) (1982) и «Пластичность и хрупкость полупроводниковых материалов при испытаниях на микротвердость» (авторы: М.И. Вальковская, Б.М. Пушкаш, Е.Е. Марончук) (1984).

Эффективность метода микроиндентирования была расширена благодаря изучению кинетики процессов, происходящих при воздействии локальной нагрузки. Так установлено, что температура образца играет важную роль в определении скорости проникновения индентора в материал. Хрупкость материалов была исследована с помощью метода акустической эмиссии (АЭ), возникающей при склерометрических испытаниях, когда процесс сопровождается образованием трещин и заметным разрушением. В этих целях разработан и изготовлен специальный прибор для оценки хрупкости материалов, использующий регистрацию сигналов АЭ.

Новые идеи, возникшие благодаря большому числу экспериментов, проведенных на грани (111) монокристаллов NaCl, PbS и CaF₂, позволили понять физическую природу полярной анизотропии твердости при квазистатическом индентировании и склерометрии. Другим важным шагом в изучении механизма деформи-

рования кристаллов при микроиндентировании стало обнаружение эффекта обратной пластической деформации, когда давление от индентора направлено внутрь образца, тогда как вытесненный материал перемещается в противоположном направлении (наружу, за пределы образца). На этой основе была предложена схема пластического течения материала в процессе микроиндентирования [4, 8] (рис. 6).

Согласно этой модели, активные плоскости скольжения могут быть разделены на две группы. Так, в случае кристаллов типа NaCl одна группа состоит из расходящихся плоскостей скольжения, формирующих четырехгранные пирамиды с вершиной около поверхности, в центре отпечатка твердости, и с основанием в глубине, в объеме кристалла. Плоскости же второй группы формируют перевернутую пирамиду. Первая группа плоскостей ответственна за перенос материала в глубь образца, тогда как другая – за его перенос к поверхности и формирование навалов вытесненного материала вокруг отпечатка.

Селективное химическое травление наряду с послойной полировкой деформированных зон и в сочетании с методами оптической микроскопии и микрокатодолюминесценции (рис. 7), электронной сканирующей и трансмиссионной микроскопии (рис. 8) методом декорирования (рис. 9) позволило наблюдать экспериментально распределение дислокаций как на поверхности, так и в объеме под отпечатком. Они подтвердили заключение о двух группах плоскостей скольжения при индентировании различных граней кристаллов и правильность моделей пластического течения, предложенного для разных материалов: ионных и ковалентных кристаллов, кристаллов со смешанным типом связи, полупроводников и полуметаллов в широком диапазоне температур (77–800 К). Установка, включающая металлографический микроскоп и специальное устройство для индентирования в режиме «in-situ», разработанная и изготовленная в лаборатории, позволила в динамике наблюдать формирование отпечатка и его окрестностей в процессе приложения и удаления нагрузки. Благодаря этому удалось выявить прямую и обратную упругопластическую деформацию отпечатков при внедрении и после удаления индентора.

Кроме того, используя химические методы травления, стало возможным продемонстрировать возникновение и развитие дислокационных структур вокруг отпечатка в процессе приложения нагрузки и после разгрузки образца.

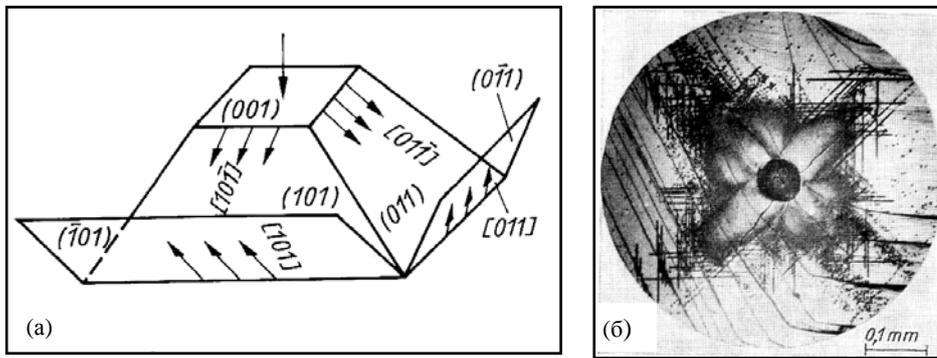


Рис. 6. Модель пластического течения материала при индентировании грани (001) ионных кристаллов типа NaCl (а) и дислокационные розетки, возникающие при индентировании стальным конусом грани (001) кристаллов LiF [8] (б).

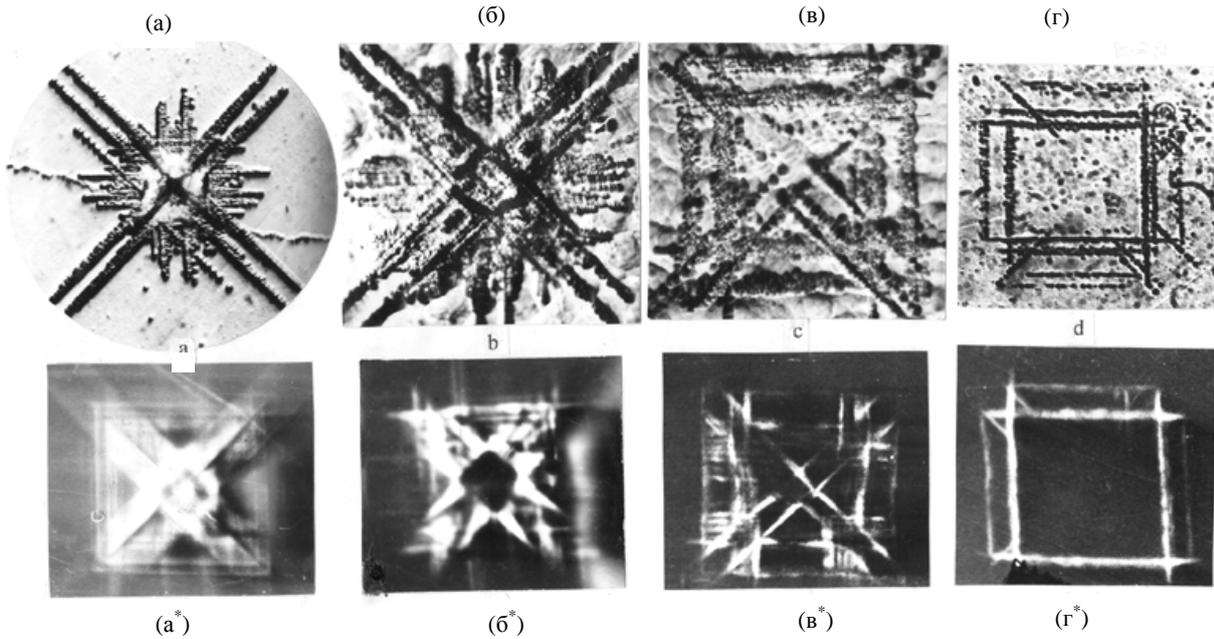


Рис. 7. MgO. Эволюция вида дислокационной розетки (а–г) и картин катодолуминесценции (а*–г*) в зоне отпечатка при последовательной полировке: на исходной поверхности (а, а*); на глубине, мкм: 15 (б, б*); 45 (в, в*); 60 (г, г*) [9].

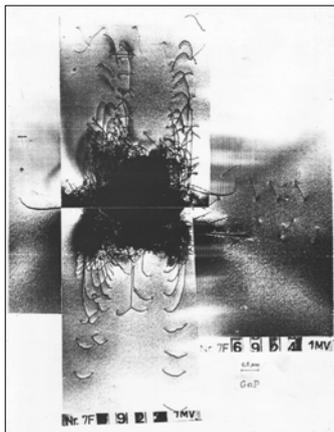


Рис. 8. Трансмиссионная электронная микроскопия. Дислокационная розетка вокруг отпечатков, нанесенных на грань (001) монокристаллов GaP при повышенной температуре ($T = 600 \text{ K}$) [9].

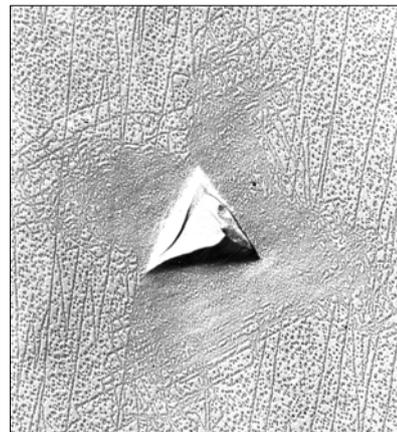


Рис. 9. Сканирующая электронная микроскопия. Дислокационная розетка, выявленная вокруг отпечатка, нанесенного на грань (001) кристаллов NaCl, с использованием техники декорирования золотом [4].

Доказано, что дополнительный перенос материала на поверхность и расширение зоны деформации происходят во время процесса разгрузки образца. Новое неизвестное явление было названо *продолженной пластической дефор-*

мацией (рис. 10). Сущность и природа явления были изложены в работах [10, 11].

Накопленные экспериментальные данные позволили выдвинуть ряд новых гипотез относительно физики процесса деформирования при

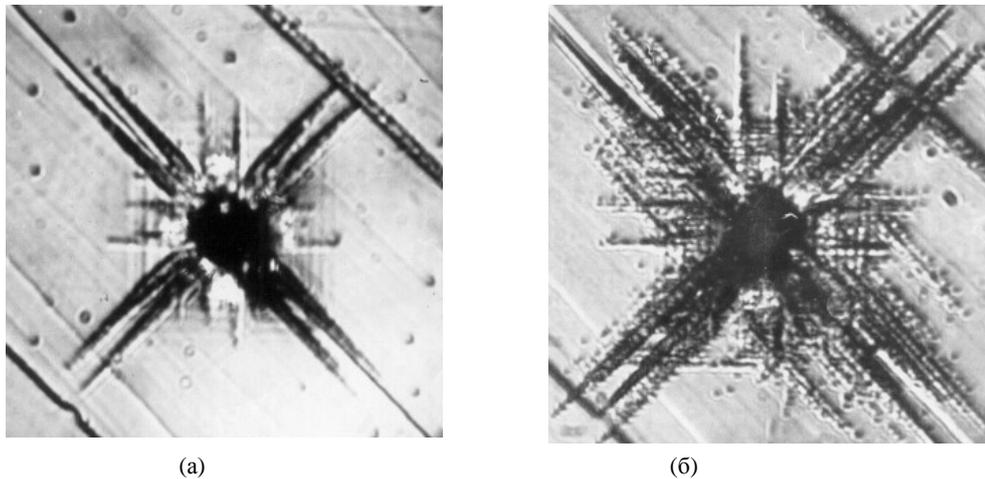


Рис. 10. Продолженная пластическая деформация. Дислокационные розетки вблизи отпечатков на грани (001) кристаллов MgO: (а) – кристалл под нагрузкой; (б) – после снятия нагрузки. $P = 3,0 \text{ N}$, $T = 300 \text{ K}$ [10].

действию концентрированной нагрузки на твердое тело. Среди них важнейшими являются гипотезы о плавном и импульсном механизмах пластической деформации [12] и о псевдоподвижности дислокаций при действии локальной нагрузки [6]. Они были описаны в ряде публикаций, включая фундаментальную монографию [4]. При плавном механизме деформирования образование отпечатка и дислокационной структуры вокруг него происходит синхронно. В случае же импульсного механизма эта синхронность нарушается, что наблюдается при деформировании твердых материалов в диапазоне комнатной температуры или при деформировании мягких кристаллов при низкой температуре ($77 \text{ K} < T_{\text{деф}} < 300 \text{ K}$).

Серия других закономерностей, способствующих решению многих проблем физики прочности и пластичности, была установлена в последующие годы. Среди них существование четырех типов упрочнения материалов: радиационного, примесного, решеточного и температурного [4]; наличие квазидеструктурированной зоны около отпечатка, которая является ответственной за перенос массы при формировании отпечатка твердости [13, 14]; проявления аномальности, имеющей место при деформировании легированных и облученных кристаллов, и т.д. Многие экспериментальные данные, обогащающие понимание основных проблем, связанных с физикой процессов микроиндентирования, получены сотрудниками после 1996 года и представляют собой продолжение исследований, начатых под руководством Ю.С. Боярской.

Поведение твердых тел под действием внешней нагрузки – ключевая проблема в современных материаловедении и технологии. Прочность, пластичность и хрупкость материалов, их способность накапливать внутренние напряжения в процессе приложения нагрузки и

релаксировать после ее удаления являются во многих случаях свойствами, которые определяют жизненный цикл товаров, различных устройств, аппаратов и конструкций. Глубокие и детальные исследования этих вопросов привели к новым фундаментальным результатам. Было установлено существование пяти структурных уровней упругопластической деформации при действии локальной нагрузки, которые характеризуются различной степенью деформации: (i) супердефектная зона наноразмерной толщины, наиболее близкая к отпечатку; (ii) квазидеструктурированная область; (iii) область с высокой плотностью дислокаций; (iv) периферическая дислокационная зона; (v) область упругой деформации [14]. Были выделены четыре основные, общие для кристаллов разного типа температурные стадии процесса микроиндентирования: хрупкая, хрупкопластическая, пластическая и высокопластическая [15]. Сформулирован и подтвержден на основе многочисленных экспериментальных данных дислокационно-дисклинационный (трансляционно-ротационный) механизм деформации при действии концентрированной нагрузки [15, 16], который раскрывает физическую природу макро-, микро- и нанотвердости и является подтверждением гипотезы о плавном и импульсном механизмах деформации, которая была выдвинута более тридцати лет тому назад проф. Ю. Боярской вместе с сотрудниками.

Диапазон изучаемых в лаборатории материалов и используемых для исследования методов был существенно расширен за последние годы. Это пленочные покрытия и размерно-ограниченные материалы на основе полупроводников и полимеров, многослойные структуры, микрокристаллические и аморфные материалы, стекла, металлы, сплавы и др.

В настоящее время метод динамического микро- и наноиндентирования занял лидирующее место в изучении механических свойств

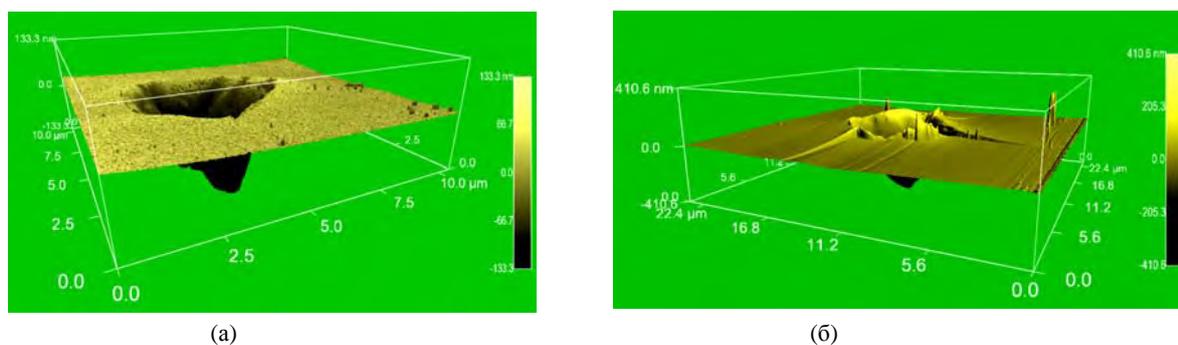


Рис. 11. АСМ. Si, грань (001). Фасетированный рельеф на поверхности вокруг и внутри отпечатка. Р, Н: (а) – 0,2; (б) – 0,5 [17].

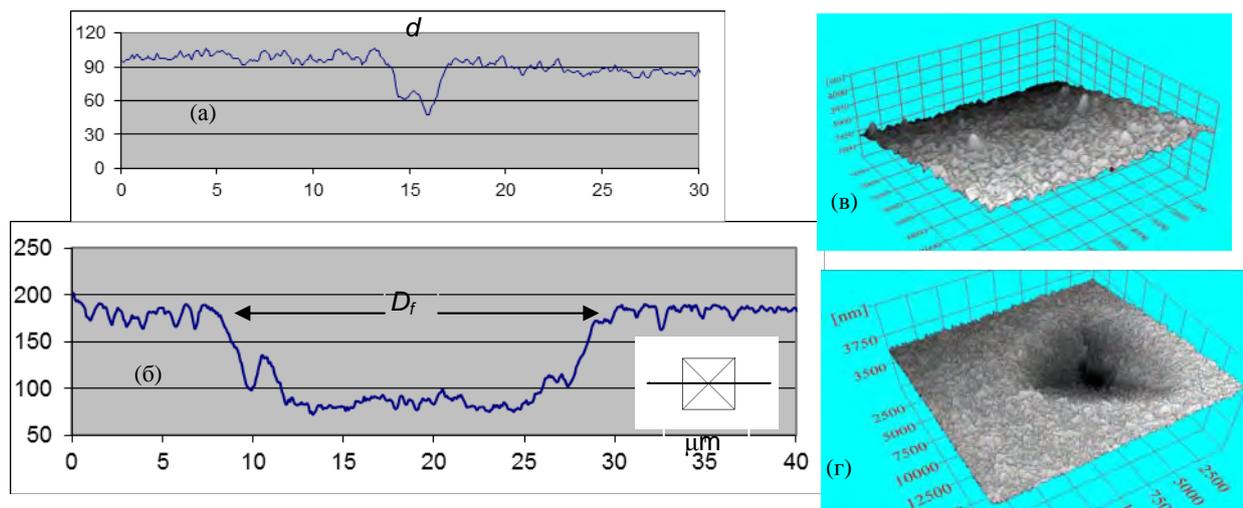


Рис. 12. Исходный отпечаток Виккерса ($P = 0,15$ Н), нанесенный на структуру ИТО/Si (а, в); тот же отпечаток после химического травления (б, г). SEM профилограмма (а, б); 3D изображение, АФМ (в, г) [17].

кристаллических и некристаллических материалов, полимерных соединений, биологических объектов и др. В сочетании с методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) он является основным для изучения пластических и прочностных свойств материалов. Результаты, получаемые методом динамического наноиндентирования, с одной стороны, позволяют изучать механические свойства размерно-ограниченных объектов, а с другой – способствуют более глубокому пониманию физических процессов, которые происходят в твердых телах при действии локального неомогенного давления.

Например, при изучении рельефа поверхности в окрестности отпечатков методом АСМ в режиме 3-D продемонстрировано, что поверхность отпечатков не является гладкой в соответствии с формой индентора, а содержит своего рода фасетки и ступеньки [17] (рис. 11). Их формирование является результатом релаксационных процессов, происходящих в материале при внедрении и удалении индентора из образца. Наличие подобного рельефа поверхности отпечатков является убедительным подтверждением трансляционно-ротационного механизма деформации материалов при действии концентрированной нагрузки [15, 16].

Выявлена аномалия селективного растворения слоя ИТО в зоне микро- и нанотпечатков. Эффект заключается в более активном растворении атомов в окрестности отпечатков из-за наличия упругопластических напряжений в зонах, свободных от дислокаций вокруг отпечатков, нанесенных на структуры ИТО/Si, SnO₂/Si [17] (рис. 12).

Более сорока лет профессор Ю.С. Боярская посвятила обучению научных сотрудников в области физики прочности и пластичности. Под ее руководством защитили диссертации 10 докторов и два доктора хабилитат физико-математических наук. Результаты ее научной деятельности были представлены в 250 научных публикациях, среди них – три монографии, две научно-популярные книги и семь препринтов.

Без сомнения, можно ожидать, что в будущем новые важные достижения внесут существенный вклад в развитие одной из важнейших областей физики, а именно физики прочности и пластичности, изучении механических свойств материалов при микро- и наноиндентировании, и это будет лучшей памятью о плодотворной деятельности известного ученого, одухотворенного исследователя и благородного

человека, каким была и остается для нас профессор **Юлия Станиславовна Боярская**.

Наиболее важные даты научной деятельности Ю.С. Боярской:

1955 г. – защита диссертации кандидата (доктора) наук: «Исследование кристаллов методом вдавливания и анизотропии кристаллов методом царапания»;

1974 г. – защита диссертации доктора (доктора хабилитат) наук: «Закономерности деформирования кристаллов при неоднородном напряженном состоянии»;

1976 г. – избрание членом Секции Научного совета АН СССР по физике прочности и пластичности;

1977 г. – избрание членом Межгосударственного Совета СССР и ГДР по физике прочности и пластичности;

1986 г. – организация под руководством проф. Ю.С. Боярской выездной сессии Научного совета АН СССР по физике прочности и пластичности (Ваду-луй-Водэ);

1989 г. – присвоение звания профессора.

Избранные публикации:

Монографии:

1. Боярская Ю.С. *Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость*. Кишинев: Штиинца, 1972. 235 с.
2. Грабко Д.З., Боярская Ю.С., Дынту М.П. *Механические свойства полуметаллов типа висмута*. Кишинев; Штиинца, 1982. 133 с.
3. Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Кац М.С. *Физика процессов микроинdentирования*. Кишинев; Штиинца, 1986. 294 с.

Статьи:

1. Boyarskaya Yu.S. (*this article was prepared by R.P. Jitaru, N.A. Palistrant, V.A. Rakhvalov, O.A. Shikimaka*). Mechanism of plastic deformation of crystals under microindentation. *Mold Journ of Phys Sci*. 2003, **2**(1), 17–42.
2. Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Лавровская Н.А. Релаксационные процессы при микроинdentировании ионных кристаллов. *Физика твердого тела*, 1992, **34**, 2292–2295.
3. Boyarskaya Yu.S., Jitaru R.P., Grabco D.Z. and Rakhvalov V.A. The Prolonged Plastic Deformation Related with the Microindentation of MgO Single Crystals. *Journal of Mat Sci*. 1998, **3**, 281–285.
4. Боярская Ю.С., Житару Р.П., Палистрант Н.А. Неадекватное изменение подвижности краевых и винтовых дислокаций под влиянием точечных дефектов. *Письма в ЖТФ*, 1995, **21**(12), 1–5.
5. Боярская Ю.С., Житару Р.П., Линте М.А., Мураховский И.Е. О нарушении корреляции между микротвердостью и пределом текучести. *Письма в ЖТФ*, 1995, **23**(12), 1–5.

6. Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Житару Р.П. Плавный и импульсный механизмы деформирования кристаллов при действии сосредоточенной нагрузки. *Известия вузов, Черная металлургия*, 1993, (8), 46–50.
7. Боярская Ю.С., Тюрин А.И., Кац М.С. О термофлуктуационном и квазивязком движении дислокационных ансамблей в поле напряжений сосредоточенной нагрузки. *Кристаллография*, 1992, **37**(4), 1044–1046.
8. Boyarskaya Yu.S., Zhitaru R.P., Palistrant N.A. The influence of impurity state on the rate dependence of yield stress of NaCl single crystals. *Phys Solid State*, 1990, **32**(11), 3433–3436.
9. Boyarskaya Yu.S., Grabco D.Z., Medinskaya M.I., Pishkova D.S. Anisotropy of Microhardness on the (001) plane of ionic crystals such as NaCl. *J Mater Sci*. 1990, **25**, 4405–4409.
10. Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Житару Р.П., Кац М.С., Цуркан В.В. Микромеханические свойства сверхпроводящей иттриевой керамики. *Сверхпроводимость: физика, химия, техника*. 1989, **2**(6), 67–71.
11. Житару Р.П., Боярская Ю.С., Линте М.А. Влияние облучения на закономерности отжига примесного упрочнения монокристаллов NaCl. *Изв. вузов СССР, серия «Физика»*, 1989, (8), 57–62.
12. Boyarskaya Yu.S., Grabco D.Z., Purich E.I. Anomalies in the Knoop Microhardness Anisotropy of Crystals. *J Mater Sci., Letters*. 1979, (14), 737–741.
13. Boyarskaya Yu.S., Grabco D.Z. Some features of plastic deformation of LiF and NaCl single crystals at high temperatures. *Kristal und Technik*, 1973, **8**(12), 1367–1377.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боярская Ю.С. *Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость*. Кишинев: Штиинца, 1972, 235 с.
2. Боярская Ю.С., Вальковская М.И. Исследование анизотропии механических свойств кристаллов методом микроинdentирования. *Методы испытаний на микротвердость*, М.: Наука, 1965, 231–237.
3. Боярская Ю.С., Шутова С.С., Житару Р.П., Грабко Д.З., Пурич Е.И. Анизотропия пластической деформации щелочно-галоидных кристаллов при действии концентрированной нагрузки. *Деформация кристаллов при действии сосредоточенной нагрузки*. Кишинев: Штиинца, 1978, 3–67.
4. Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Кац М.С. *Физика процессов микроинdentирования*. Кишинев: Штиинца, 1986, 294 с.
5. Вальковская М.И., Пушкаш Б.М., Марончук Е.Е. *Пластичность и хрупкость полупроводниковых материалов при испытаниях на микротвердость*. Кишинев: Штиинца, 1984, 107 р.
6. Boyarskaya Yu.S., Grabco D.Z. and Pishkova D.S. About the nature of temperature hardening of ionic crystal with NaCl lattice, *Crystal Research and Technology*, 1985, **20**, **11**, K113–K114.

7. Боярская Ю.С., Житару Р. П., Шутова С.С. Анизотропия радиационного упрочнения монокристаллов NaCl. *Физика и химия обработки материалов*, 1974, (5), 161–200.
8. Boyarskaya Yu.S., Grabco D.Z. Some features of plastic deformation of LiF and NaCl single crystals at high temperatures. *Kristal und Technik*. 1973, **8**(12), 1367–1377.
9. Grabco D. Development of scientific direction of strength and plasticity physics in Moldova. *Mold J Phys Sci*. 2008, **7**(4), 407–419.
10. Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Лавровская Н.А. Релаксационные процессы при микроиндентировании ионных кристаллов. *Физика твердого тела*, 1992, **34**, 2292–2295.
11. Boyarskaya Yu.S., Zhitaru R.P., Grabco D.Z. and Rakhvalov V.A. The Prolonged Plastic Deformation Related with the Microindentation of MgO Single Crystals. *Journal of Mat Sci*. 1998, (3), 281–285.
12. Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Житару Р.П. Плавный и импульсный механизмы деформирования кристаллов при действии сосредоточенной нагрузки. *Известия ВУЗов, Черная металлургия*, 1993, (8), 46–50.
13. Grabco D.Z., Lavrovskaya N.A. and Medinskaya M.I. Regularities of Deformation and Destruction under Local Loading of Ionic Crystals. *Latvian Journal of Phys & Techn Sci*. 1991, (5), 72–80 (in Rus.).
14. Grabco D., Pushcash B., Dyntu M. and Shikimaka O. Thermal Evolution of Deformation Zones around Microindentation in Different Types of Crystals. *Phil Mag. A*, 2002, **82**(10), 2207–2215.
15. Grabco D. Dislocation-Disclination Mechanism of Deformation under Microindentation. *Mold J Phys Sci*. 2002, (3), 94–103.
16. Grabco D., Shikimaka O., Harea E. Translation-Rotation Plasticity as Basic Mechanism of Plastic Deformation in Macro-, Micro- and Nanoindentation Processes. *Journal of Phys. D: Appl Phys*. 2008, **41**(7), 074016 (9 pp).
17. Grabco D., Shikimaka O., Harea E., Gehm N., Schimmel Th. and Thomas Koch. Anomalous Dissolution of Microindentation Deformed Zone of ITO/Si Coated System. *Physica Status Solidi. C*. 2009, **6**(5), 1295–1298.

Summary

Professor Julia Boyarskaya is the foundress of the scientific school in the field of plasticity and durability in Moldova, the initiator and principal ideologist of the Laboratory of Mechanical Properties of Crystals of the Institute of Applied Physics, Moldova. For 35 years she studied various materials: bulk crystals with ionic, covalent and mixed types of bonds; metals; crystalline and amorphous semiconductors; materials for biomedical applications; high-temperature superconductors; minerals and rocks. As a result, many new phenomena were revealed and important regularities in the field of strength and plasticity physics were established. Among them we can name the influence of two principal factors in the micro-indentation process: the crystal interior stress state and the dislocation sliding geometry; the models of plastic flow of materials under microindentation in a large temperature range (77–800 K); the hypothesis about the smooth and impulsive mechanism of plastic deformation; the hypothesis about the dislocation pseudo-mobility at low temperatures; and the phenomenon of prolonged plastic deformation. The results of her scientific activity were published in more than 250 scientific articles, 3 monographs, 2 textbooks and 7 preprints.