

Список использованных источников

1. Волчек, А.А. О моментах распределения вероятностей модели диффузионного типа в практике гидрологии / А.А. Волчек, И.И. Гладкий, Л.П. Махнист // Математика и ее приложения : межвуз. сб. науч. тр. / Ассоциация математиков вузов северо-запада ; под ред. Д.П. Голоскокова, А.Р. Шкадовой. – СПб., 2011. – Вып. 3. – С. 139–148.
2. Волчек, А.А. О параметрах распределения вероятностей диффузионной модели стохастической гидрологии / А.А. Волчек, И.И. Гладкий, Л.П. Махнист // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2010. – № 5. – С. 48–53.
3. Волчек, А.А. О решении системы дифференциальных уравнений, одной из моделей многолетних колебаний речного стока / А.А. Волчек, Л.П. Махнист, В.С. Рубанов // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4, Матэматыка. Фізіка. – 2010. – № 1. – С. 68–77.
4. Волчек, А.А. О сходимости решения одной малопараметрической модели многолетних колебаний речного стока / А.А. Волчек, Л.П. Махнист, В.С. Рубанов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2009. – № 5. – С. 2–5.
5. Волчек, А.А. Об асимптотическом поведении параметра одного из распределений вероятностей речного стока / А.А. Волчек, Л.П. Махнист, В.С. Рубанов // Проблемы водоснабжения, водоотведения и энергосбережения в западном регионе Республики Беларусь : сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., Брест, 22–23 апр. 2010 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С.В. Басов [и др.]. – Брест, 2010. – С. 45–49.
6. Махнист, Л.П. Использование систем компьютерной алгебры в задаче гидрологического моделирования / Л.П. Махнист, Е.Н. Зашук, И.И. Гладкий // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 22 окт. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина ; под общ. ред. Д.В. Грицука. – Брест, 2021. – С. 54–56.
7. Махнист, Л.П. К решению задачи гидрологии с использованием систем компьютерной алгебры / Л.П. Махнист, Е.Н. Зашук, И.И. Гладкий // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 28–29 апр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина ; под общ. ред. А.И. Басика. – Брест, 2022. – С. 17–19.
8. Махнист, Л.П. Применение систем компьютерной алгебры для решения модели стохастической гидрологии / Л.П. Махнист, Е.Н. Зашук, И.И. Гладкий // Математические и физические методы исследований: научный и методический аспекты : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 22–23 апр. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина ; под общ. ред. Н.Н. Сендера. – Брест, 2021. – С. 96–98.

УДК 669\2.8.620.178.6

В.С. Савенко¹, О.Б. Скворцов², В.И. Сташенко², Чэнь Янцзы¹

¹Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина
²Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РЕШЁТОЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Рассмотрены основные электронные и решёточные механизмы, методика эксперимента получения электропластического эффекта

Ключевые слова: электропластический эффект, пластическая деформация облучение, дислокации, виброперегрузки.

Введение. В 1963 г на линейном ускорителе электронов в Институте физической химии Российской академии наук О.А. Троицким был обнаружен и опубликован [1] электронно-пластический эффект, который заключался в действии ускоренных электронов на пластическую деформацию кристаллов цинка диаметром 1 мм и длиной 20 мм, находящихся в квазиупругом состоянии. Интенсивность облучения составляла 10^{11} эл/см²с, энергия электронов – 1,4–1,5 МэВ. Электроны указанных энергий оказывают объёмное действие на деформируемый металл. Расстояние от выходного окна ускорителя до испытуемых образцов составляло 100–120 мм. Для деформации образцов использовалась дистанционно работающая испытательная машина типа Instron, установленная под выходное окно ускорителя. В образцах тонкой полоской туши вдоль их оси отмечалось

место выхода на поверхность дислокаций в элементах лёгкого скольжения $(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$. Образцы устанавливались в зажимы испытательной машины так, чтобы для одной их группы облучение во время деформации растяжением было поперечным элементам скольжения (а), а для другой группы продольным (б). В результате экспериментов было установлено, что в последнем случае при совпадении направления облучения с элементами легкого скольжения кристаллов имеет место повышенная их пластичность до момента квазихрупкого разрушения. Последнее состояние достигалось нанесением на поверхность образцов плёнки ртути толщиной 5 мкм по методике, описанной в монографии [2] (рисунок 1).

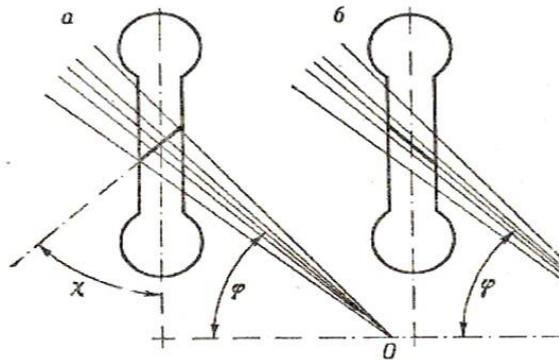


Рисунок 1 – Положение плоскости базиса монокристаллического образца цинка относительно потока частиц, испускаемых источником, расположенным в точке O : а – поперечное положение базиса; б – продольное, после поворота образца вокруг своей оси на 180°

Полученный результат был объяснён действием «электронного ветра» внешнего происхождения на подвижные дислокации в плоскостях базиса (0001) кристаллов цинка, а также возможной интенсификацией работы источников дислокаций. Явление получило название электронно-пластического эффекта (ЭПЭ) при облучении. Помимо публикации [1], сведения об этом эксперименте были опубликованы в монографиях. Однако практическое применение обнаруженного явления не получило из-за опасного для жизни тормозного и синхротронного излучения в рабочей камере линейного ускорителя электронов.

Основная часть. ЭПЭ на токе был экспериментально обнаружен в 1969 г в работах при действии одиночными импульсами тока амплитудной плотности $J_m = 10^5 \text{ A/cm}^2$ и длительности $\tau \sim 10^{-4}$ с на деформацию кристаллов цинка растяжением и сжатием при температуре жидкого азота. Эффект проявлялся, как показано на диаграммах растяжения (рисунок 2), в скачках вниз, т. е. падениях приложенной нагрузки от машины Instron за счет мгновенных скачкообразных удлинений образцов, скачков пластической деформации продолжительностью примерно по 10^{-3} с. Указанное явление возникало без участия макроскопического теплового эффекта, поскольку образцы и токоподводящие контакты, впаянные в их головки, находились в жидком азоте при температуре -196°C . В случае сжатия образцов во время действия на них импульсами тока, скачки ЭПЭ были направлены также вниз, в сторону разупрочнения металла. Таким образом, тепловой эффект отсутствовал, в противном случае дилатометрическое удлинение сжимаемых образцов вызывали бы пики ЭПЭ не вниз, а вверх. При остановках работы машины, когда процессы активной деформации прекращались, наступала релаксация приложенных напряжений и небольшая дополнительная пластическая деформация, усиленная действием импульсного тока. Измерения с помощью приваренных к контрольным образцам термопар показали наличие лишь небольшого теплового эффекта относительно окружающего жидкого азота в моменты прохождения по ним импульсов тока. Тепловой эффект был не более одного градуса. Фиксировался также эффект Пельтье. Как видно из представленных на рисунке 2 диаграмм, под влиянием импульсов тока происходило значительное (примерно вдвое) увеличение пластической деформации кристаллов до момента их хрупкого разрушения. Уменьшался коэффициент упрочнения, а также величина отдельных пиков с ростом частоты посылок тока. Последние два результата можно объяснить истощением под влиянием тока дислокационной структуры деформируемых кристаллов. В последующие годы многими авторами в мире были повторены эти опыты. Они теоретически обсуждались. Продолжались экспериментальные

исследования ЭПЭ на монокристаллах и поликристаллах различных металлов и сплавов не только при низких, но и при комнатных температурах.

Существование ЭПЭ было подтверждено американскими учеными под руководством проф. Г. Конрада на поликристаллическом титане десять лет спустя после первых российских публикаций. Вопреки распространенному мнению, что воздействие электромагнитными полями на металл во время обработки его давлением (ОМД) следует относить к сильным, эти воздействия, как правило, отличаются относительно низкими затратами энергии – не более 10^{-4} эВ в расчете на один атом, что на один-два порядка меньше затрат энергии на простое механическое деформирование (10^{-3} эВ) или тепловом действии (10^{-2} эВ). В.Е. Громовым с сотрудниками было установлено увеличение подвижности дислокаций в массивных кристаллах цинка под действием импульсов тока. При попутном «электронном ветре» скорость дислокаций в элементах скольжения $\langle 1122 \rangle$ $\langle 1123 \rangle$ кристаллов увеличивалась на 25–30 %, что явилось доказательством наличия полярной части ЭПЭ, измеренной на дислокационном уровне. Встречно направленные импульсы тока также инициировали перемещение дислокаций, но в меньшей степени, видимо, в силу влияния тока на стартовые напряжения движения дислокаций, которые уменьшались на величину порядка 0,14–0,16 МПа. О.А. Троицким с сотрудниками было установлено, что внутреннее трение $\text{tg } \Phi$ в кристаллах кадмия повышается под влиянием импульсного тока, как считается, за счет увеличения подвижности дислокаций. При действии импульсного тока с амплитудной силой тока 200 А и длительностью импульсов 50 мкс дефект модуля был больше, чем при действии переменным током эквивалентного теплового действия, а потери тем меньше, чем больше скважность импульсного процесса $Q = T/\tau$ при заданном периоде T и частоте посылок импульсов тока $F = 100$ Гц. В отношении ЭПЭ существенны два основных действия. Экспериментально установлено, что при внешнем электрическом импульсном воздействии происходит характерный ударный механический отклик металлов (рисунок 2), сопровождающийся ультразвуком. Вибрационные скачки возникают в моменты начала переднего и заднего фронтов импульса, переходя в затухающие колебания. Вибрации не связаны с плавным нарастанием тока через образец и с постоянным уровнем тока при его действии.

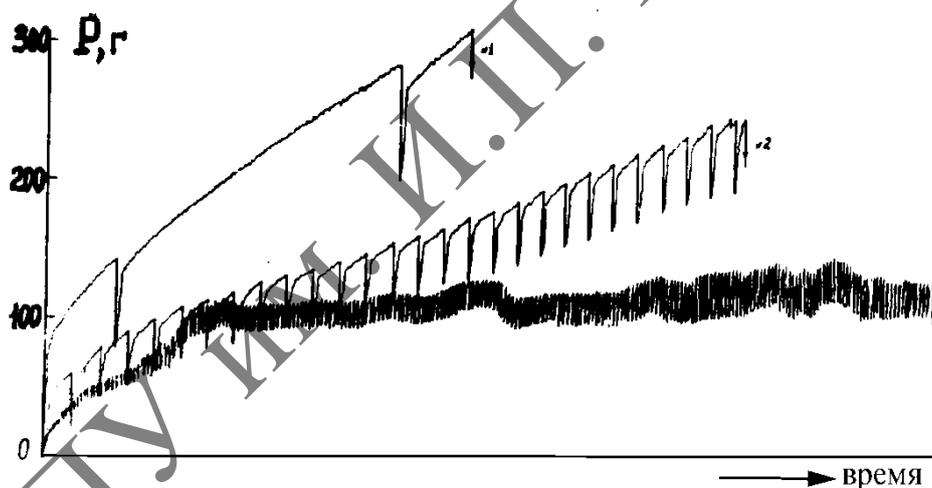


Рисунок 2 – Скачкообразная деформация кристаллов цинка, вызванная прохождением через них импульсов тока через каждые 200 с (1), 20 с (2), а также через каждую секунду (3). Амплитудная плотность тока составляла $J_m = 10^5 \text{ А/см}^2$ при длительности импульсов $\tau \sim 10^{-4}$ с

Согласно полученным данным эксперимента, амплитуда виброперегрузок на фронтах электрического импульса изменяется скачкообразно, которые происходят симметрично и имеют противоположные знаки. Следует учесть, что направление отклика зависит от вектора внешнего электрического импульса. В то же время следует отметить, что амплитуда виброперегрузки слабо зависит от длительности электрического импульса.

Основными характеристиками отклика на действие электрического импульса на металл при возникающих вибрациях является скорость колебаний в единицу времени – вибрационное ускорение a_v и ее безразмерная величина – виброперегрузка, измеряемая в единицах ускорения свободного падения a_v/g (рисунок 3).

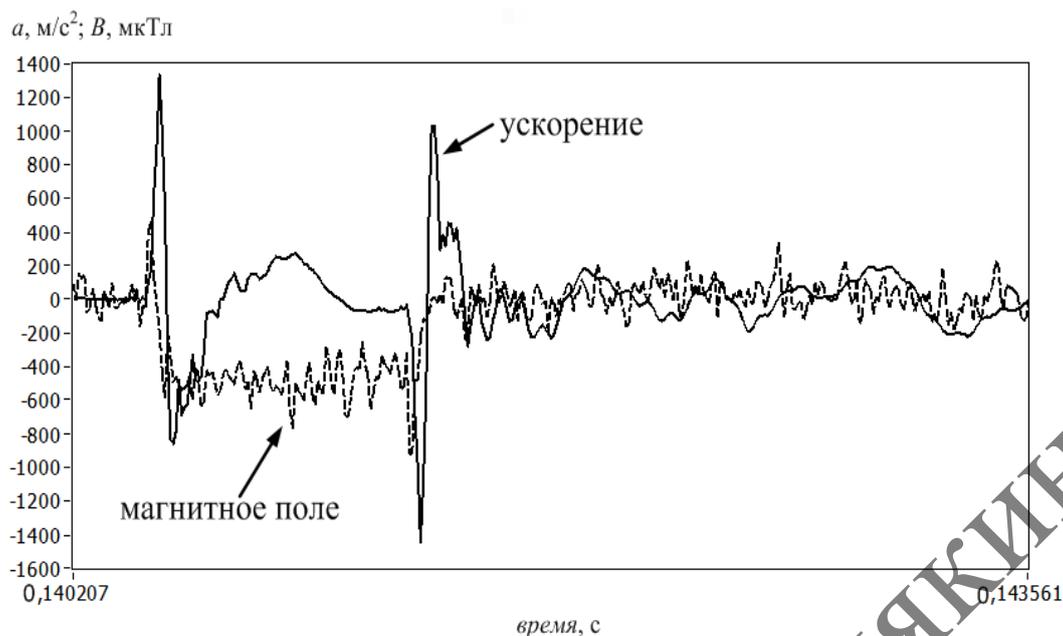


Рисунок 3 – Сигналы виброперегрузок, вызванных действием электрического импульса амплитудой 5 вольт, длительностью 1000 мкс для титанового образца диаметром 3 мм длиной 150 мм

Следует отметить, что датчик магнитного поля расположен на расстоянии 5 мм от него. B_C – 3 кольцевая магнитная индукция в виде кругового магнитного поля вокруг проводника вблизи его поверхности. B_R – 4 радиальная составляющая индукции магнитного поля, в направлении радиуса проводника.

Список использованных источников

1. Троицкий, О.А. Об анизотропии действия электронного и γ -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии / О.А. Троицкий, О.А. Лихтман // Докл. АН СССР. – 1963. – Т. 148. – С. 332–334.
2. Физико-химическая механика металлов / В.И. Лихтман, Е.Д. Шукин, П.А. Ребиндер. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 303 с.
3. Троицкий, О.А. Внешние электронное и электростатическое воздействия на материалы. Упрочнение и разупрочнение, изменение структуры и хрупкости под влиянием облучения и полей / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, В.А. Демин. – М. : МГИУ, 2002. – 274 с.