



Дацко О. И.

Матросов Н. И.

Донецкий
физико-технический
институт
им. А.А. Галкина
НАН Украины

Недыбалюк А. Ф.

Винницкий
государственный
педагогический
университет
им. М. Коцюбинского

УДК 537.221

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ОБРАЗЦАХ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ГИДРОЭКСТРУЗИИ И ВОЛОЧЕНИЯ

Використовуючи вільні затухаючі коливання, виявлені особливості поведінки рівня амплітудно залежного внутрішнього тертя (АЗВТ) у зразках мідної дротини, які були вибрані з чотирьох послідовних технологічних етапів її отримання методом багатоперехідної гідроекструзії та волочіння і відрізнялись числом дротових елементів – волокон, ступенем пластичної деформації і структурою матеріалу.

The features of the behavior of the level of amplitude dependent internal friction (ADIF) in samples of copper wire, which were selected from four successive technological stages of its receipt by the method of multijunction hydrostatic extrusion and dragging were identified, and differed in the number of wire elements - fibers, the degree of plastic deformation and material structure for wing free lowing oscillation.

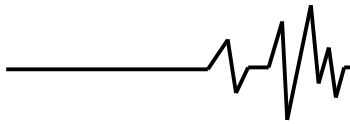
Введение

В работах по механической спектроскопии сравнительно мало исследований, выполненных на образцах, имеющих волокнистое строение. В том числе слабо изучен вопрос о том, как влияет волокнистое строение и его характер на поведение дислокаций при микропластической деформации (МПД) материала. Определенную информацию об этом можно получить, используя методику низкочастотного внутреннего трения (ВТ) и образцы медной проволоки, полученной методами многопереходной пакетной гидроэкструзии и волочения [1,2]. В этих образцах волокнистое строение создается проволочными элементами из меди одной чистоты, заключенными в наружной оболочке из меди другой чистоты и характеризуется числом проволочных элементов (N), степенью их интегральной деформации ($\ln R$, где R – вытяжка),

структурой, задаваемыми технологическим этапом получения проволоки.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служили вначале деформированные, а затем отожженные образцы проволоки №№ 1, 2, 3, 4 (диаметром 3 мм и рабочей длиной 40 мм), отобранные с четырех последовательных технологических этапов ее получения. Образец № 1 состоял из меди МВЭ (99,99%), образцы №№ 2, 3, 4 содержали проволочные элементы из меди МВЭ, заключенные в оболочку из меди МОБ (99,97%). Образцы в исходном (деформированном) состоянии имели, соответственно: число проволочных элементов $N = 1, 211, 211^2, 211^3$; степень интегральной деформации $\ln R = 1.9, 7.7, 14.9, 19.4$; структуру полосчатую (образец №1), субструктуру (образцы №№ 1, 2, 3, 4), элементы волокон (образцы №№ 2, 3, 4) и наноструктуры (образец № 4). После нагрева до 400°C в



образце № 1 полосчатость исчезала, рекристаллизация заканчивалась, в образцах №№ 2, 3, 4 элементы волокон сохранялись, рекристаллизация задерживалась.

Использовалась установка ВТ типа обратный крутильный маятник с частотой колебаний около 1 Гц [3]. АЗВТ изучалось при ступенчатом изменении (увеличении и последующим уменьшении) амплитуд относительных деформаций материала ϵ в интервале $2 \cdot 10^{-5}$ – $80 \cdot 10^{-5}$. Величина уровня АЗВТ определялась путем подсчета числа затухающих свободных колебаний при

уменьшении задаваемой амплитуды деформации (АД) на 20–40%. Погрешность измерений не превышала 5%.

Результаты исследований и обсуждение

Результаты измерений АЗВТ в образцах №№ 1, 2, 3, 4 представлены на рис 1–4. Из них следует, что уровень ВТ с увеличением АД обнаруживает рост, на фоне которого наблюдаются изменения типа перегиба, с последующим изменением интенсивности роста, максимума, полочки.

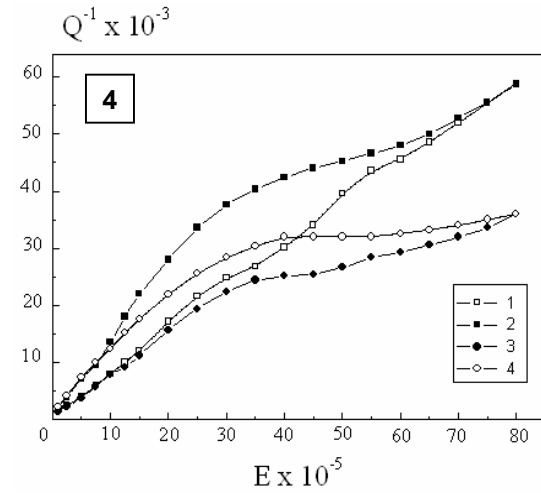
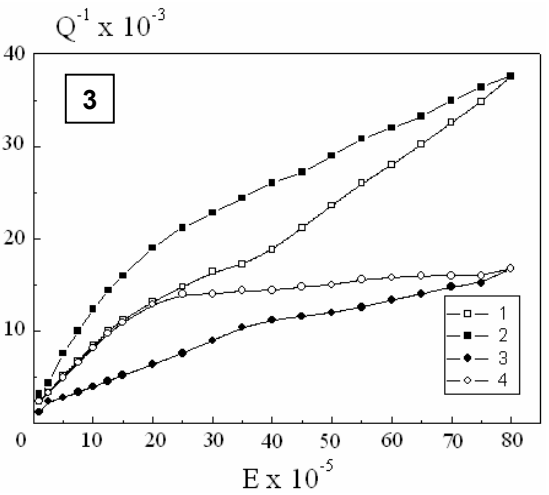
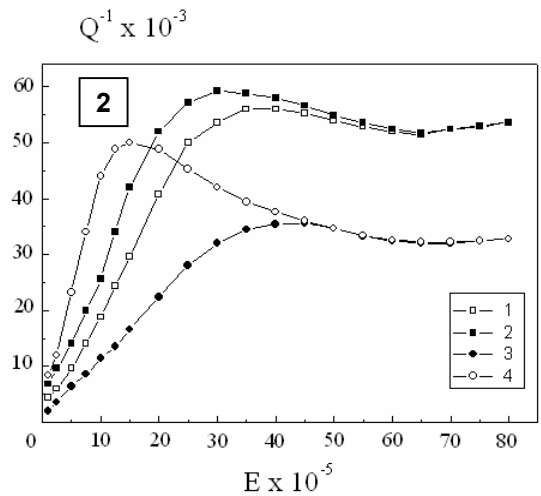
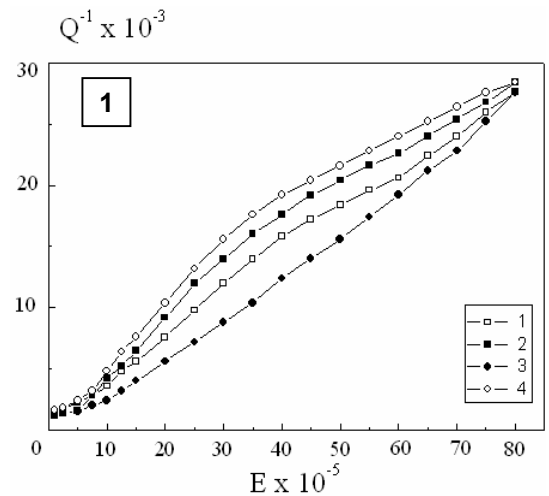
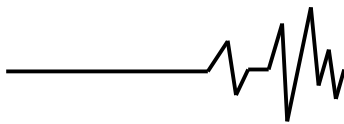


Рис. 1–4. АЗВТ в образцах №№ 1, 2, 3, 4 медной проволоки, отобранных с четырех последовательных технологических этапов ее получения методом многопереходной гидрокструзии и волочения: соответственно после первого (рис. 1), второго (рис. 2), третьего (рис. 3), четвертого (рис. 4) этапа. АЗВТ деформированных (кривые 1, 2) и отожженных (кривые 3, 4) образцов при увеличении (кривые 1, 3) и уменьшении (кривые 3, 4) амплитуды деформации

Измерения показали, что АЗВТ в деформированных и отожженных образцах при уменьшении АД обнаруживает гистерезис с

разомкнутой петлей, когда $\epsilon \geq 5 \cdot 10^{-5}$ в образце № 2 и $\epsilon \geq 10 \cdot 10^{-5}$ в образцах №№ 1, 3, 4. Это свидетельствует о том, что уровень АЗВТ при



изменении АД (при $\varepsilon \geq 5 \cdot 10^{-5}$ и $\varepsilon \geq 10 \cdot 10^{-5}$) связан с изменением плотности новых подвижных дислокаций, которые появляются, двигаются и взаимодействуют с препятствиями в результате МПД материала во время измерения уровня АЗВТ.

Наблюдаемая АЗВТ (микрочластичность) [3] обусловлена поведением уровня плотности новых подвижных дислокаций в зависимости от задаваемой АД. Фактически это разность между уровнем плотности родившихся новых подвижных дислокаций при заданной АД и уровнем плотности этих дислокаций, которые при заданной АД утратили подвижность (частично или полностью) в результате встречи и взаимодействия с препятствиями. Так, когда препятствия достаточно сильно задерживают движение дислокаций, - на АЗВТ наблюдается перегиб и уменьшение интенсивности роста (рис. 1, 3, 4). Если с увеличением АД, такая задержка ослабевает, то появляется перегиб в противоположную сторону и увеличение интенсивности роста (рис. 1, 3, 4). В случае, когда препятствия достаточно сильно блокируют движение дислокаций (перед препятствиями образуется скопление дислокаций, в которых они взаимно блокируют друг друга и источник), на АЗВТ наблюдается максимум (рис. 2). Если с увеличением АД такая блокировка ослабевает, - то появляется минимум и стабилизация уровня в виде полочки (рис. 2).

Последующее ступенчатое уменьшение АД и внутреннее напряжение в материале обуславливают возвращение дислокаций в источники. При этом подвижные дислокации вновь взаимодействуют с препятствиями. Дислокации, заблокированные в скоплениях перед препятствиями, становятся подвижными. Это увеличивает плотность подвижных дислокаций и задерживает процесс их исчезновения. В результате при ступенчатом уменьшении АД характер АЗВТ повторяется в обратном порядке, его общий уровень выше, чем при увеличении АД, зависимость смещения влево — имеет место гистерезис.

Сравнение показывает, что АЗВТ в образце, материал которого вначале находится в деформированном, а затем в отожженном состоянии, при увеличении и последующем уменьшении АД (кривые 1-4) обнаруживают сходный характер (присущий данному образцу). Это говорит о том, что в результате измерений и отжига в структуре материала образца не происходит выявляемых существенных качественных изменений. Наряду с этим имеют место количественные изменения. Так, общий уровень АЗВТ в

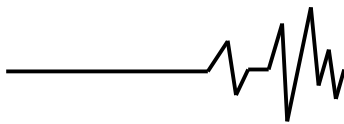
деформированном образце выше чем в отожженном (кривые 1 и 3), особенно в образцах №№ 2, 3, 4. Это указывает на то, что материал в деформированном состоянии обладает более высоким уровнем микрочластичности, чем в отожженном состоянии. Очевидно, при получении проволоки материал в результате пластической деформации с высокими степенями обжатия нагревался и пластифицировался, а при последующем отжиге уровень его микрочластичности снижался (благодаря возврату и деформационному старению).

Характер АЗВТ в образцах №№ 2, 3, 4 отличается от наблюдаемого в образце № 1. В свою очередь, характер АЗВТ в образце №2 отличается от такового в образцах №№ 3, 4. Все эти различия можно характеризовать особенностями поведения АЗВТ, присущими образцу № 2.

Первая особенность — более ранний, резкий и значительный рост АЗВТ при увеличении АД. Он наблюдается при $\varepsilon > 2 \cdot 10^{-5}$ и достигает максимального значения при $\varepsilon = 25 \cdot 10^{-5}$. В образцах №№ 3, 4 и особенно в образце №1 имеет место более слабый, постепенный рост уровня АЗВТ, который достигает максимального значения при $\varepsilon = 80 \cdot 10^{-5}$. Это означает, что в образце №2 плотность новых подвижных дислокаций с ростом АД увеличивается интенсивнее, чем в образцах №№ 3, 4 и особенно в образце №1. Очевидно, в структуре образца № 2 имеются дополнительные и более интенсивные источники новых подвижных дислокаций.

Вторая особенность — сильная блокировка роста уровня АЗВТ, обуславливающая появление максимума с вершиной при $\varepsilon = 35 \cdot 10^{-5}$. В образцах №№ 1, 3, 4 такой блокировки нет, - наблюдается задержка роста. Она проявляет себя перегибом и уменьшением интенсивности роста уровня АЗВТ (соответственно при $\varepsilon > 15 \cdot 10^{-5}$; $25 \cdot 10^{-5}$; $35 \cdot 10^{-5}$). Это означает, что в образце № 2 препятствия блокируют движение дислокаций, а в образцах №№ 1, 3, 4 — притормаживают его. Очевидно, в структуре образца № 2 существуют дополнительные и более интенсивные препятствия движению дислокаций.

Третья особенность — стабилизация уровня роста АЗВТ, которая наблюдается после сильной блокировки уровня АЗВТ. Она проявляется минимумом и полочкой в интервале значений $\varepsilon = 60 \cdot 10^{-5} \div 80 \cdot 10^{-5}$. В образцах №№ 1, 3, 4 такая стабилизация уровня отсутствует. У них после задержки



роста уровня АЗВТ наблюдается перегиб и увеличение интенсивности роста уровня АЗВТ (соответственно при $\varepsilon > 60 \cdot 10^{-5}$; $35 \cdot 10^{-5}$; $35 \cdot 10^{-5}$). Ситуация сохраняется до $\varepsilon = 80 \cdot 10^{-5}$ за исключением образца № 4 (у него при $\varepsilon > 55 \cdot 10^{-5}$ наблюдается перегиб в противоположную сторону и уменьшение интенсивности роста АЗВТ). Это означает, что в образце № 2 блокировка дислокаций препятствиями существенно уменьшилась, но продолжает иметь место. При этом она проявляет себя так, что плотность подвижных дислокаций при увеличении АД не изменяется. Фактически, начиная с некоторого момента увеличения АД свойства структуры материала как источников дислокаций и как препятствий блокирующих их движение, уравниваются друг друга. Вероятно, имеет место эффект самоорганизации процесса размножения и блокировки новых подвижных дислокаций. Его можно рассматривать как проявление стабильного микропластического течения. Отличительной особенностью, которого является то, что оно практически не зависит от амплитуды деформации материала, измеряющейся в некотором интервале. Наблюдаемое поведение АЗВТ в образцах №№ 1, 3, 4 говорит о том, что торможение движения дислокаций со стороны препятствий ослабло (затем повысилось вновь при $\varepsilon > 55 \cdot 10^{-5}$ в образце № 4).

Очевидно, в структуре образца № 2 источники и препятствия движению дислокаций при повышенных значениях АД ведут себя иначе, чем в образцах №№ 1, 3, 4.

Четвертая особенность — другой характер гистерезиса (особенно в отожженном материале): вначале это отсутствие изменений, затем значительный максимум, потом резкое уменьшение, при этом общий уровень АЗВТ более высокий и сильнее смещен влево (чем у АЗВТ при ступенчатом увеличении АД). В образцах №№ 1, 3, 4 гистерезис не такой: АЗВТ только уменьшается: (начиная с $\varepsilon < 80 \cdot 10^{-5}$) вначале слабо, затем более сильно (в образце № 4 — уменьшение выражено вначале слабо, затем еще слабее, потом сильно), общий уровень ниже, смещение влево слабее. Это говорит о том, что в образце № 2 эффект стабильного микропластического течения наблюдается не только при увеличении АД в некотором интервале, но при уменьшении АД в этом же интервале, как в деформированном, так и в отожженном материале. К этому нужно добавить, что в образце № 2 интенсивнее блокируется движение дислокаций в скоплениях перед препятствиями, и

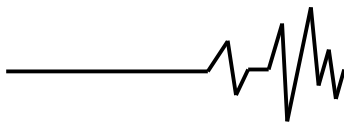
соответственно, их количество больше разблокируется и перейдет в подвижное состояние при ступенчатом уменьшении АД. Очевидно, в образце № 2 свойства источников дислокаций и препятствия их движению отличаются от свойств, присущих источникам и препятствиям дислокаций в образцах №№ 1, 3, 4.

Пятая особенность — стабильный характер изменений уровня АЗВТ после отжига относительно уровня АЗВТ в деформированном состоянии (или разности АЗВТ деформированного и отожженного материала). Он наблюдается при $\varepsilon > 30 \cdot 10^{-5}$. В образцах №№ 1, 3, 4 такая разность АЗВТ при $\varepsilon > 30 \cdot 10^{-5} \div 40 \cdot 10^{-5}$ имеет другой характер: в образце № 1 — уменьшается, в образцах № 3, 4 — увеличивается. Это свидетельствует о том, что в образце № 2 изменения источников дислокаций и препятствий движению дислокаций более скоррелированно, согласованно, чем в образцах №№ 1, 3, 4. Очевидно, в образце № 2 источники дислокаций и препятствий движению дислокаций более тесно связаны или эти роли выполняют одни и те же объекты структуры материала.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что образцы №№ 2, 3, 4 в сравнении с образцом № 1 обнаруживают, с одной стороны, ряд особенностей поведения уровня АЗВТ, а с другой стороны, имеют более высокие значения N , $\ln R$ и структуру, которая содержит элементы волокнистого строения. Это позволяет полагать, что наблюдаемые особенности поведения АЗВТ в образцах №№ 2, 3, 4 относительно образца № 1 обусловлены влиянием всех трех факторов, особенно наличием в структуре материала элементов волокнистого строения. Очевидно, наблюдаемые различия в поведении АЗВТ обусловлены дефектами кристаллической решетки, играющими роли источников и препятствий движения новых подвижных дислокаций и их различиями в образцах № 1, 2, 3, 4.

Наиболее вероятно эти роли в образцах №№ 1, 2, 3, 4 играют границы зерен [4, 5] и субзерен, а в образцах №№ 2, 3, 4 еще дополнительно и границы волокон. По видимому, границы волокон, как и границы зерен [4, 5] являются вначале дополнительными источниками новых подвижных дислокаций, а затем и дополнительными препятствиями блокирующими движение дислокаций.

В свою очередь, образец № 2 в сравнении с образцами №№ 3, 4 обладает, с



одной стороны, элементами волокнистого строения, носящими первоначальный характер появления, а с другой стороны, у него наблюдаются особенности поведения уровня АЗВТ. Это обстоятельство позволяет считать, что обнаруженные особенности поведения АЗВТ в образце № 2 обусловлены первоначальным характером появления в структуре этого образца элементов волокнистого строения и образуемых ими границ волокон. Эти границы волокон сформированы меньшим числом проволоочных элементов и в условиях более низкой степени деформации, т.е., вероятно, они обладают сравнительно более высоким уровнем неравновесного метастабильного состояния, в сравнении с границами волокон в образцах №№ 3, 4.

Отметим, что наблюдаемый в образце № 4 при $\epsilon > 60 \cdot 10^{-5}$ повышенный уровень АЗВТ связан, вероятно, с первоначальным появлением в структуре материала элементов наноструктуры [2].

Заключение

Установлено, что наличие элементов волокнистого строения в структуре деформированных и отожженных образцов медной проволоки оказывает влияние на характер их АЗВТ, связанного с МПД материала на стадии возникновения, движения и взаимодействия с препятствиями новых подвижных дислокаций (при АД в интервале $\epsilon = 2 \cdot 10^{-5} \div 80 \cdot 10^{-5}$).

Наиболее сильное влияние на характер АЗВТ оказывает первоначальное появление элементов волокнистого строения и границ волокон (после второго технологического этапа получения проволоки). В этом случае при ступенчатом увеличении АД наблюдается вначале резкий и значительный рост, затем максимум, потом стабилизация уровня АЗВТ.

Предполагается, что границы волокон (в используемых условиях МПД материала) играют вначале роль дополнительных источников, а затем и роль дополнительных препятствий движению новых подвижных дислокаций.

Литература

1. Спусканюк В.З., Сенникова Л.Ф., Павловская Е.А., Матросов Н.И., Дугадко А.Б., Белоусов Н.Н., Заика Т.П. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, Международный сборник Научных трудов. 2002, вып. 1, с. 255.
2. Дацко О.И., Абрамов В.С., Дугадко А.Б., Матросов Н.И., Чишко В.В., Шевченко Б.А. // ФТВД, 2004, 14, №2, с.109–116.
3. Криштал М.А., Головин С.А. // Внутреннее трение и структура металлов, М., Металлургия, 1976, гл. IV.
4. Мулюков Р.Р., Ахмадеев Н.А., Волиев Р.З., Копылев В.И., Михайлов С.Б. // Металлофизика, 1993, т. 15, № 1, с. 50-59.
5. Дацко О.И., Матросов Н.И., Дмитренко В.Ю. // Металлофизика и новейшие технологии, 2006. т. 28, № 12, с. 1655-1660.