

## **Прочность и пластичность медных прутков, подвергнутых одно- и разнонаправленному кручению**

Ю. Н. Подрезов, Е. Г. Пашинская\*, Д. Г. Вербило,  
М. А. Кралюк\*\*, Н. И. Даниленко, И. Ю. Окунь

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича  
НАН Украины, Киев, e-mail: ver@ipms.kiev.ua

\*Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина  
НАН Украины, Донецк

\*\*Донецкий научно-исследовательский институт судебных экспертиз  
МЮ Украины, Донецк

*Изучены механические свойства при растяжении и кручении медной проволоки, предварительно подвергнутой кручению на различное количество оборотов в прямом и обратном направлениях. Установлен немонотонный характер зависимости механических свойств от степени предварительной деформации. Проведен фрактографический анализ поверхностей разрушения образцов. Из анализа фрактограмм следует, что образец, продеформированный в прямом направлении на 25 оборотов, разрушается практически без шейки. Однако по мере увеличения количества обратных оборотов склонность к шейкообразованию постепенно восстанавливается.*

**Ключевые слова:** *растяжение, кручение, деформирующее напряжение, комбинированная деформация.*

### **Введение**

Использование комбинированной пластической деформации является одним из перспективных направлений получения наноструктуры деформационного происхождения, характеризующейся сочетанием высоких прочностных свойств с достаточным уровнем пластичности. За последние 10 лет накоплены обширные знания о влиянии комбинированной пластической деформации со сдвигом (КПДС) на процессы структурообразования. Были развиты специальные схемы интенсивной пластической деформации (ИПД) со сдвигом: интенсивное кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование, винтовое прессование [1—4]. Следует отметить, что все предложенные схемы в качестве методов воздействия используют сочетание высокого давления и сдвиговых деформаций. Этими методами удалось получить так называемые объемные наноструктурные материалы с размером зерен 0,1—0,2 мкм и специфической субструктурой, содержащей решеточные и зернограничные дислокации.

Отметим, что предлагаемые в настоящее время способы ИПД не могут быть применены в массовом производстве для изготовления крупногабаритных изделий (например, при производстве проката или проволоки), поскольку размеры образцов, получаемых с использованием интенсивного

© Ю. Н. Подрезов, Е. Г. Пашинская, Д. Г. Вербило, М. А. Кралюк,  
Н. И. Даниленко, И. Ю. Окунь, 2013

кручения под высоким давлением, равноканального углового прессования и винтового прессования, невелики. Ограничения связаны с тем, что в этих схемах в комбинации со сдвигом используется сжатие, которое реализуется в малом технологическом пространстве. Схема кручения с растяжением лишена этого недостатка. Такое сочетание в полной мере можно отнести к разряду комбинированных схем пластической деформации со сдвигом.

К сожалению, несмотря на большое количество работ [5—8], посвященных влиянию режимов ИПД на структурообразование и формирование свойств в деформированных материалах, из-за специфики этого вида механической обработки (в упомянутых ранее схемах за один проход накапливается большая деформация) не исследованной оказалась область малых и средних деформаций. Такая информация может оказаться чрезвычайно важной при использовании комбинированных схем деформирования. Ее можно получить, например, применяя достаточно простую схему кручения с последующим испытанием на одноосное растяжение.

Цель данной работы — исследовать влияние комбинированной деформации кручением с растяжением на механические свойства чистой меди. Поскольку с технической точки зрения операция кручения дает большие возможности по изменению степени деформации и по знаку прилагаемой нагрузки, то выполняли эксперименты двух типов: растяжение и однонаправленное кручение (РОК) и растяжение с разнонаправленным кручением (РПК) (далее РОК и РПК образцы).

### Материалы и методы исследования

Испытанию подвергали образцы, изготовленные из меди М1. Длина  $l$  образцов составила 150 мм, диаметр  $d$  — 3,0 мм. Образцы подвергали рекристаллизационному отжигу при температуре 500 °С в течение 1 ч. Степень деформации, которой подвергали медные образцы в процессе кручения, определяли по формуле

$$\gamma_{\text{предв}} = \frac{\pi n d}{l}, \quad (1)$$

где  $n$  — суммарное количество оборотов;  $d$  — диаметр образца;  $l$  — длина зоны деформации.

Кручение проводили как в одном направлении (до 100 оборотов), так и последовательно в двух направлениях. Во втором случае образец закручивали до заданного количества оборотов в одну сторону (прямые обороты), после чего разгружали и закручивали на нужное число оборотов в другую сторону (обратные обороты). Этот режим обработки в таблицах обозначили дробью: в числителе — число прямых оборотов, в знаменателе — число обратных оборотов.

Все полученные таким образом заготовки испытывали на одноосное растяжение. Для этого из центральной части заготовок вырезали образец длиной 75 мм. Центральную (рабочую) часть образца длиной 25 мм предварительно уменьшали электрополировкой до диаметра 2,7 мм. Образец зажимали в захваты-щечки с круглыми пазами и испытывали на одноосное растяжение на разрывной машине УТМ-100 со скоростью движения траверсы 1,25 мм/мин ( $\approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ) с автоматической записью диаграммы нагружения и компьютерным расчетом стандартных механи-

ческих характеристик. По результатам эксперимента определены: условные пределы текучести  $\sigma_{0,01}$  (соответствует пластической деформации 0,01%) и  $\sigma_{0,2}$  (соответствует пластической деформации 0,2%), предел прочности  $\sigma_B$  (напряжение, соответствующее максимальной нагрузке на первичной диаграмме), равномерное удлинение  $\delta_{\text{равн}}$  (измеряемое для точки, соответствующей максимальной нагрузке), общее удлинение  $\delta_{\text{общ}}$  (соответствует разрушению образца), истинное разрушающее напряжение  $S_{\text{разр}}$  (рассчитывается делением нагрузки в момент разрушения на конечную площадь образца в шейке), истинная деформация в момент разрушения  $e_r$  (рассчитывается как логарифм отношения начальной площади к конечной), относительное сужение  $\psi$  (рассчитывается как отношение изменения площади образца к начальной площади).

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты механических испытаний представлены в табл. 1 и 2. В табл. 1 содержатся данные для всех образцов, закрученных на разное количество оборотов в одну сторону (с нулевым или минимальным количеством оборотов в обратном направлении); в табл. 2 даны результаты исследования образцов, продеформированных в одном направлении на 25 оборотов, а затем — на различное количество оборотов в противоположном направлении.

Вначале рассмотрим изменения механических свойств РОК образцов, а также РРК образцов, закрученных на минимальное количество обратных

**Т а б л и ц а 1. Механические свойства РОК образцов, а также РРК образцов, закрученных на минимальное количество обратных оборотов**

Количество оборотов $N_1/N_2$	$\sigma_{0,01}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_{\text{равн}}$ , %	$\delta_{\text{общ}}$ , %	$S_{\text{разр}}$ , МПа	$e_r$	$\psi$ , %
Исходный	120,7	157,4	263,4	35,5	41,2	601,5	1,31	73,1
5/0	176,2	225,0	269,0	21,9	27,7	604,6	1,37	74,6
10/0	184,8	262,2	294,3	7,2	14,6	446,8	0,94	61,3
15/15	211,2	309,8	339,2	1,0	6,8	412,8	0,82	55,9
25/0	205,6	300,6	361,9	1,8	2,4	387,3	0,14	13,2
27/0	180,3	308,3	367,4	2,3	2,9	408,3	0,14	13,3
30/0	181,2	288,4	359,7	2,5	3,1	384,6	0,18	16,1
35/0	196,4	272,0	390,3	4,9	5,5	428,4	0,14	13,6
40/0	161,5	286,57	388,4	3,1	4,4	410,1	0,11	10,5
50/0	196,6	329,03	399,4	2,5	4,0	414,2	0,10	9,3
55/4	177,9	305,14	382,4	1,0	1,1	399,1	0,08	7,4
65/10	208,1	336,77	413	1,3	1,3	417,6	0,01	1,3
72/0	193,7	316,39	421,8	2,7	4,0	457,4	0,137	12,8
75/0	200,3	291,02	454,5	5,9	8,2	573,0	0,32	27,5

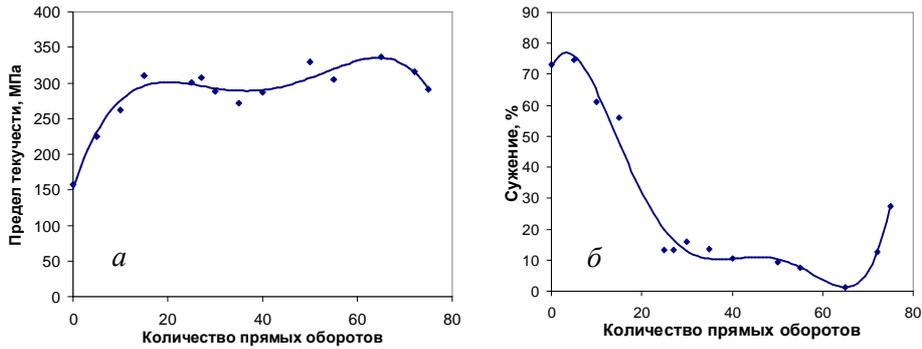


Рис. 1. Зависимости предела текучести (*a*) и сужения (*б*) от количества прямых оборотов РОК образцов, а также РПК образцов, закрученных на минимальное количество обратных оборотов.

оборотов. Анализ механических свойств целесообразно начать с сопоставления данных, представленных в табл. 1. Проанализируем, как увеличение количества оборотов, а значит и степени предварительной деформации кручением с растяжением, влияет на предел текучести (рис. 1, *a*). Следует отметить, что кручение на один оборот дает прирост степени деформации на  $\gamma \sim 6,3\%$ . На начальном участке зависимости  $\sigma_{0,2}$ —количество оборотов  $N$  при малом количестве оборотов или при малой степени сдвиговой деформации предел текучести растет с увеличением степени деформации в полном соответствии с теорией Тейлора [9]. Согласно литературным данным [10—12], на этом этапе возрастает плотность хаотически расположенных дислокаций.

Начиная примерно с 25 оборотов ( $\gamma = 157\%$ ) предел текучести уменьшается. Снижение упрочнения на этой стадии можно объяснить взаимодействием (аннигиляцией) подвижных дислокаций, эмитируемых при одноосном растяжении, и дислокаций на границах слабоориентированных ячеек, возникших при кручении. Седловидный характер зависимости проявляется до степени деформации, соответствующей 50 оборотам ( $\gamma = 315\%$ ). Начиная примерно с этой степени деформации в меди, продеформированной по схеме РОК, количество большеугловых границ в деформационной наноструктуре становится достаточным, чтобы создать замкнутый перколяционный кластер.

На рис. 1, *б* показана зависимость сужения от степени предварительной деформации. Хотя технически более востребована характеристика относительного сужения, в физике прочности чаще всего оперируют величиной истинной деформации до разрушения  $e_r$  (она точнее характеризует изменение структуры образца в шейке, особенно вдоль оси растяжения). Зная ее значение, можно оценить трещиностойкость материала по данным испытаний на одноосное растяжение по формуле, предложенной в работе [13]:

$$K_{1c} = n \sqrt{3E\sigma_{\tau}e_r \frac{d}{2}}, \quad (2)$$

где  $n$  — показатель деформационного упрочнения (для ГЦК материалов  $n \approx 1$ );  $E$  и  $\sigma_{\tau}$  — модуль упругости и предел текучести материала;  $e_r$  — истинная деформация до разрушения;  $d$  — размер зерна. Из формулы следует, что если  $e_r$  изменяется на 2 порядка, то трещиностойкость

изменится на порядок. Аналогичная связь характерна для ударной вязкости [14], хотя эту связь сложнее описать аналитически.

На рис. 1, б видно, что деформация до разрушения резко уменьшается примерно с 15 оборотов. Своеобразное “охрупчивание” образцов с увеличением степени деформации обычно имеет однозначное отображение в характере изломов (рис. 2). В отличие от ОЦК металлов, где вязкохрупкий переход ассоциируется со сменой механизма разрушения от ямочного к сколу, в ГЦК материалах (и, в частности, в меди) скол не проявляется никогда. Зато в тонких образцах часто реализуется механизм среза. Как фрагмент разрушения, он существует везде, где реализуется вязкое разрушение по механизму “чашечка — конус”. Когда центральная часть образца разрушается слиянием пустот, остаточная периферическая часть шейки сдвигается, образуя конус. В этом случае смена механизма обусловлена изменением напряженного состояния в тонком приповерхностном слое. Близость поверхности изменяет напряженное состояние в тонких образцах (например, листах), которые тоже часто разрушаются срезом.

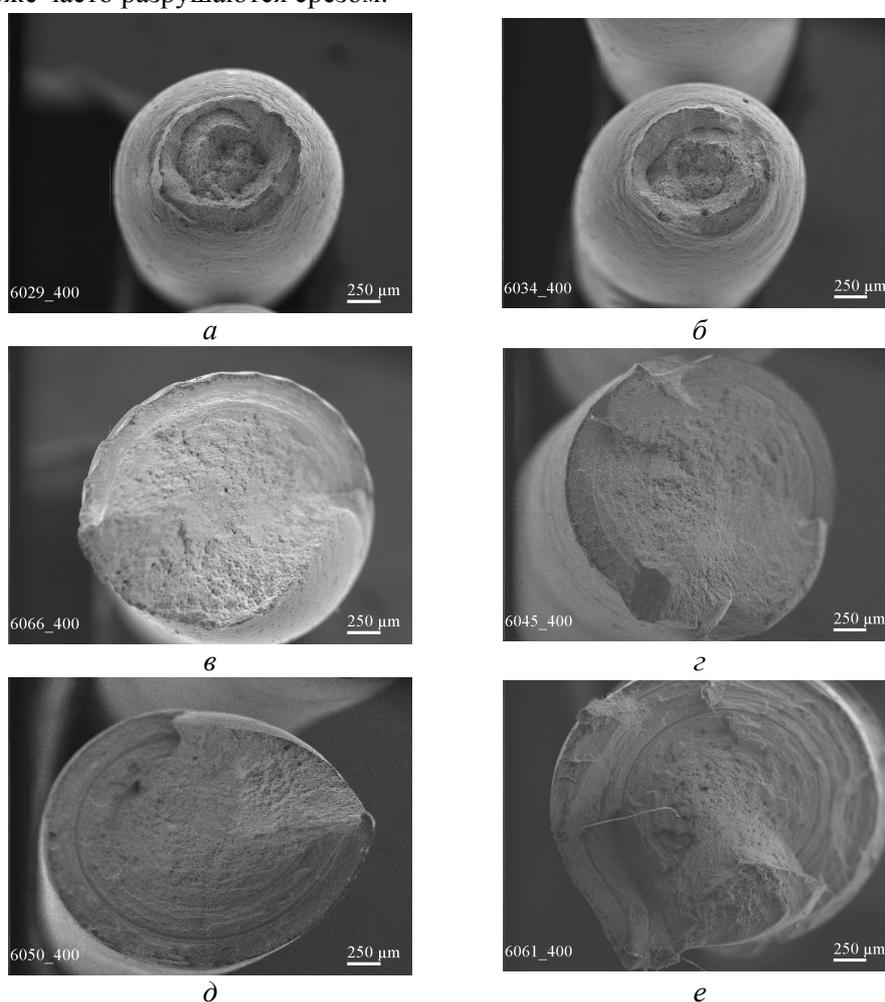


Рис. 2. Общий вид поверхности разрушения образцов, испытанных на одноосное растяжение после кручения на 0 (а), 10 (б), 25 (в), 40 (г), 50 (д) и 72 оборота (е).

В наших экспериментах образцы достаточно толстые, однако специфическое расположение структурных элементов деформационного происхождения относительно оси растяжения может спровоцировать срез. При этом при больших деформациях, когда возникают разориентированные ячейки, этот механизм может усиливаться межъячейковым разрушением. На рис. 3 представлены фрагменты изломов центральной и периферической части образцов. Центральная часть образца во всех случаях разрушается по ямочному механизму (рис. 3, *а, в*), хотя в менее пластичных образцах ямки располагаются под углом (рис. 3, *в*), подобно тому, как это происходит в конусной (периферической) части более пластичных образцов. В периферической части малопластичных образцов излом формируется концентрическими полосами, декорированными мелкими продолговатыми ямками и гребнями (рис. 3, *г*).

Рассмотрим механические свойства РПК образцов, закрученных на 25 оборотов в одну сторону и определенное количество оборотов в обратную. Анализ табл. 2 показывает, что механические свойства медных образцов изменяются нелинейно с ростом степени суммарной предварительной деформации. Обращает на себя внимание необычный характер зависимостей механических свойств от количества обратных оборотов. Предел текучести (рис. 4, *а*) сначала заметно снижается на первых пяти оборотах, а затем резко повышается (до исходного уровня) и далее очень медленно растет (примерно до 50 оборотов).

Падение предела текучести и рост равномерной деформации при малом количестве обратных оборотов могут быть вызваны внедрением свежих дислокаций в структуру со слаборазориентированными ячейками.

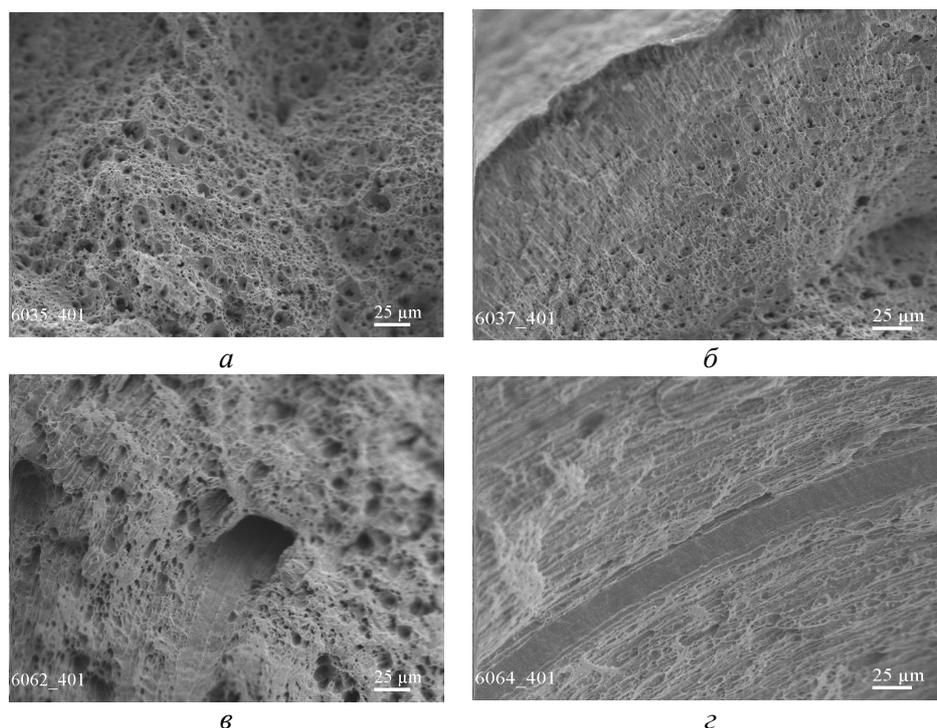


Рис. 3. Фрагменты изломов образцов, испытанных на растяжение после кручения на 10 (*а, б*) и 72 оборота (*в, г*); *а, в* — центр; *б, г* — край образцов.

**Т а б л и ц а 2. Механические свойства РРК образцов, закрученных на 25 оборотов в одну сторону и определенное количество оборотов в обратную**

Количество оборотов $N_1/N_2$	$\sigma_{0,01}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta_{равн.}$ , %	$\delta_{общ.}$ , %	$S_{разр.}$ , МПа	$e_r$	$\Psi$ , %
Исходный	120,7	157,4	263,4	35,50	41,20	601,5	1,314	73,11
25/0	205,6	300,6	361,9	1,85	2,39	387,3	0,142	13,22
25/1	189,0	252,4	350,9	3,12	3,93	385,7	0,225	20,14
25/4	141,2	198,4	314,8	3,45	7,65	361,3	0,509	39,91
25/5	198,3	289,1	343,9	2,35	7,54	372,1	0,622	46,33
25/7	196,8	296,2	344,2	1,64	7,95	645,1	1,123	67,47
25/10	198,0	292,1	362,9	2,47	8,83	538,2	0,922	60,21
25/15	196,8	296,2	362,4	1,64	7,77	725,0	1,238	71,01
25/20	285,5	303,2	362,7	2,52	11,50	700,8	1,233	70,86
25/25	219,5	322,9	372,7	1,34	6,45	593,5	1,072	65,76
25/50	191,6	334,6	409,2	2,31	3,21	424,0	0,105	9,96
25/75	174,1	302,4	439,6	3,57	3,57	453,8	0,035	3,45
25/77	187,3	288,7	376,7	0,52	0,52	378,7	0,005	0,52
25/100	211,5	329,2	416,6	2,12	4,00	507,8	0,337	28,61

Такой эффект наблюдали В. Ф. Моисеев и И. Д. Горная, он описан в их монографии по упрочнению [15]. При этом изменение механических свойств сопровождалось изменением размера ячеек. Эффект будет наибольшим, если при повторном нагружении изменяется схема нагружения. Объясняется он взаимодействием свежих дислокаций со стенками малоугловых границ на ранних стадиях их образования. В стенках происходит частичная аннигиляция дислокаций и, как следствие, разупрочнение материала. В работах Н. И. Даниленко с сотрудниками показано, что следствием такого взаимодействия может быть некоторое падение предела текучести и существенное повышение трещиностойкости, которое наблюдалось в материалах на основе железа, предварительно продеформированных прокаткой до структурного состояния, соответствующего образованию слаборазориентированных ячеек [16].

Наиболее сложная и необычная зависимость относительного сужения от количества обратных оборотов (рис. 4, б). Кручение в обратную сторону повышает пластичность практически на порядок. Ее величина быстро растет с увеличением количества обратных оборотов, достигая максимума в окрестности 20 предварительных оборотов. При дальнейшем увеличении количества обратных оборотов (до 50 оборотов) величина деформации резко снижается.

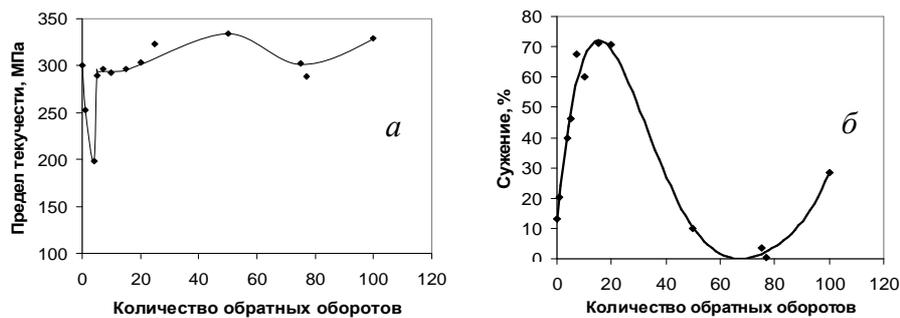


Рис. 4. Зависимости предела текучести (а) и сужения (б) РРК образцов, закрученных на 25 оборотов в одну сторону и определенное количество оборотов в обратную.

На рис. 5 показаны результаты фрактографического анализа образцов, продеформированных в прямом и обратном направлениях. Образец, продеформированный в прямом направлении на 25 оборотов, разрушается

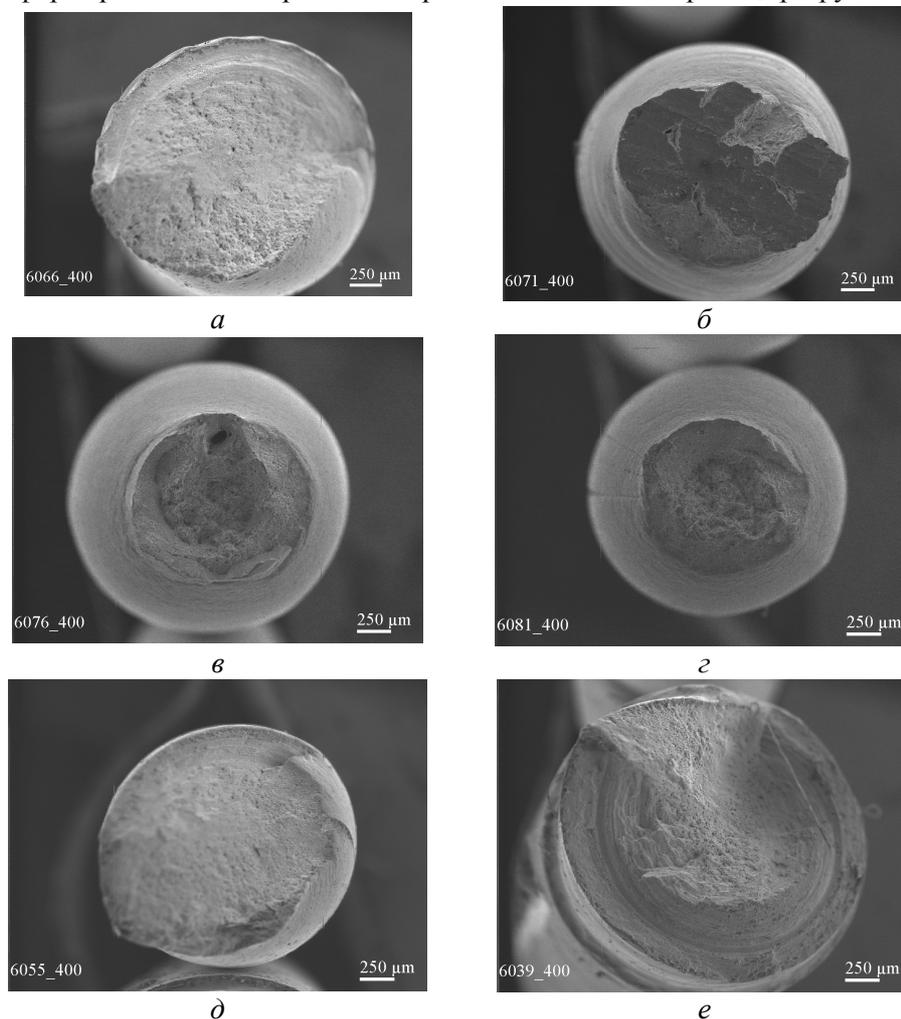


Рис. 5. Общий вид поверхности разрушения образцов, испытанных на одноосное растяжение после кручения на 25/0 (а), 25/10 (б), 25/15 (в), 25/25 (г), 25/50 (д) и 65/10 оборотов (е).

практически без шейки (рис. 5, *a*), однако по мере увеличения количества обратных оборотов склонность к шейкообразованию постепенно восстанавливается (рис. 5, *b—z*). При большом количестве прямых и обратных оборотов, например 50/50 (рис. 5, *d*), склонности к шейкообразованию не наблюдается. При количестве оборотов 65/10 (рис. 5, *e*) образец имеет наименьшую пластичность среди всех исследованных. Его относительное сужение составляет 1,3%.

Таким образом, повышение пластичности при использовании схемы РРК проявляется на макроуровне в восстановлении способности образцов к шейкообразованию и на микроуровне — в реализации механизма ямочного разрушения. Оба эти явления контролируются напряженным состоянием, возникающим в образце при одноосном растяжении. Законы шейкообразования определяются напряженно-деформированным состоянием, а склонность к ямочному разрушению — кристаллографической и структурной анизотропией. По-видимому, при обратном кручении возникает дополни-

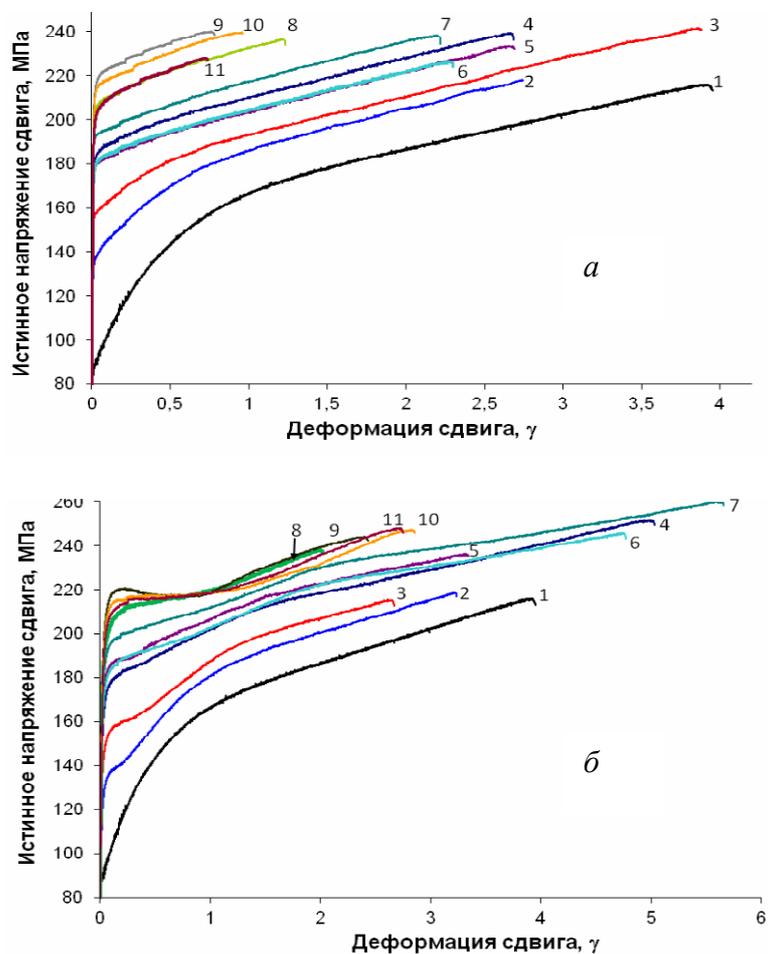


Рис. 6. Диаграммы дополнительного кручения образцов, подвергнутых РОК в том же направлении (*a*) и в противоположном (*b*). Режимы РОК: 1 — исходный; 2 — 5/0; 3 — 10/0; 4 — 25/0; 5 — 30/0; 6 — 35/0; 7 — 40/0; 8 — 50/0; 9 — 72/0; 10 — 75/0; 11 — 100/0.

тельная сетка дислокационной структуры, не совпадающая с первичной. Она, с одной стороны, несколько увеличивает упрочнение, а с другой — “исправляет” возникшую при первичном нагружении анизотропию (наличие которой, как уже упоминалось, способствует срезу).

Необычное механическое поведение образцов, подвергнутых разнонаправленному кручению, подтверждают результаты механических испытаний на кручение, выполненные на испытательной машине ТТМ-200. Образцы, подвергнутые однонаправленному кручению на различное количество оборотов, испытывали на повторное кручение с записью диаграммы нагружения. Кручение осуществляли до момента разрушения либо в ту же сторону, что и первичное нагружение, либо в обратную. Диаграммы кручения представлены на рис. 6. На этом рисунке по оси ОХ — условная деформация сдвига  $\gamma$  без учета предварительной деформации, а по оси ОУ — истинное напряжение, рассчитанные по методике, изложенной в работе [17]. Видно, что при повторном кручении в ту же сторону (рис. 6, а) диаграммы не имеют каких-либо особенностей, а деформация до разрушения во всех случаях примерно одинакова и равна сумме предварительной и повторной деформаций. Диаграммы кручения образцов, подвергнутых повторному кручению в обратном направлении (рис. 6, б), имеют характерные минимумы, подобные тем, которые выявлены на рис. 1. При этом разрушение образцов, подвергнутых предварительному закручиванию на 25—40 оборотов, происходит при значительно больших степенях деформации, чем у всех остальных образцов (рис. 7).

Таким образом, при разнонаправленном кручении до определенных степеней деформации возникают релаксационные процессы, что приводит к снижению напряжений и резкому увеличению пластических характеристик.

Уточнение механизмов структурообразования позволило бы управлять особенностями структуры и, соответственно, уровнем механических свойств для получения проволоки, сочетающей высокую прочность с повышенной вязкостью. Проведение таких исследований представляется чрезвычайно полезным в дальнейшем, что позволит сделать некоторые

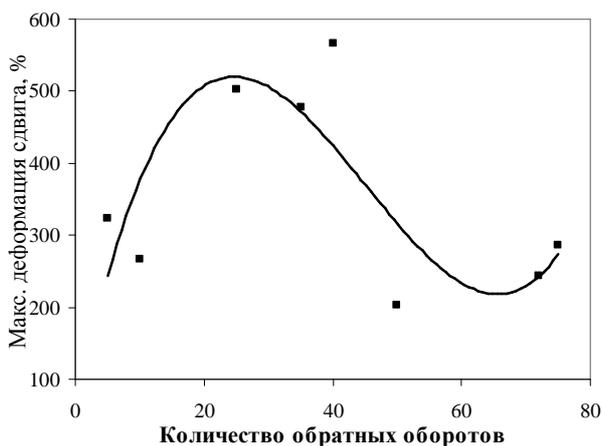


Рис. 7. Зависимость максимальной деформации сдвига от количества обратных оборотов.

предварительные выводы по изменению уровня механических свойств медной проволоки М1 после деформации кручением с одновременным растяжением.

### Выводы

Деформация медной проволоки М1 одно- и разнонаправленным кручением позволяет повысить ее прочностные характеристики с увеличением степени деформации.

При определенных режимах деформации медной проволоки М1 методом разнонаправленного кручения удастся повысить прочностные характеристики на 60—65% и одновременно получить высокие значения пластичности.

Величины истинного разрушающего напряжения и предельной деформации определяют служебные характеристики деформированной проволоки. Поэтому полученные экстремальные значения этих величин могут быть использованы для оптимизация режимов обработки кручением.

1. *Segal V. M.* Materials processing by simple shear // Mater. Sci. Eng. A. — 2002. — **197**. — P. 157—164.
2. *Сегал В. М.* Процессы пластического структурообразования металлов / [В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов та ін.]. — Минск : Наука и техника, 1994. — 232 с.
3. *Beygelzimmer Y.* On ultrafine grained materials: properties and structure / Y. Beygelzimmer, V. Varyukhin, D. Orlov // Proc. of the Second Internat. Symp., Los Alamos Nat. Lab. Edition, 2002. — P. 234—238.
4. *Бейгельzimmer Я. Е.* Винтовая экструзия — процесс накопления деформаций / [Я. Е. Бейгельzimmer, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков]. — Донецк : ТЕАН, 2003. — 87 с.
5. *Валиев Р. З.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. — М. : Логос, 2000. — 272 с.
6. *Добаткин С. В.* Сравнительный анализ структуры и свойств бескислородной меди после различных способов интенсивной пластической деформации / [С. В. Добаткин, Г. А. Салищев, А. А. Кузнецов и др.] // Физика и техника высоких давлений. — 2006. — **16**, № 4. — С. 23—36.
7. *Валиев Р. З.* Структура и механическое поведение ультрамелкозернистых металлов и сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации / Р. З. Валиев, Р. К. Исламгалиев // Физика металлов и металловедение. — 1998. — **85**, № 3. — С. 161—177.
8. *Подрезов Ю. Н.* Два подхода к анализу кривых деформационного упрочнения / Ю. Н. Подрезов, С. А. Фирстов // Физика и техника высоких давлений. — 2006. — **15**, № 4. — С. 17—34.
9. *Taylor J. I.* Hardening of aluminium at the plastic deformation // J. Inst. Metals. — 1928. — **62**. — P. 307—311.
10. *Трефилов В. И.* Физические основы прочности тугоплавких материалов / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, С. А. Фирстов. — К. : Наук. думка, 1975. — 315 с.
11. *Конева Н. А.* Физическая природа стадийности пластической деформации / Н. А. Конева, Э. В. Козлов // Изв. вузов. Физика. — 1990. — № 2. — С. 89—106.
12. *Конева Н. А.* Современная картина пластической деформации / Н. А. Конева, Э. В. Козлов // Там же. — 2004. — № 8. — С. 90—98.
13. *Hahn G. T.* The influence of fine dispersion on the cleavage / G. T. Hahn, A. R. Rosenfield // Trans. AIME. — 1967. — **239**. — P. 668—674.

14. Фирстов С. А. Структура и прочность порошковых материалов / [С. А. Фирстов, А. Н. Демидик, И. И. Иванова и др.] / Под ред. С. А. Фирстова, М. Шлессара. — К. : Наук. думка, 1993. — 175 с.
15. Трефилов В. И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / [В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский и др.] / Под ред. В. И. Трефилова. — К. : Наук. думка, 1989. — 256 с.
16. Подрезов Ю. Н. О структурной чувствительности механических свойств предварительно деформированных ОЦК-металлов / Ю. Н. Подрезов, Н. И. Даниленко, Д. Г. Вербило // Электронная микроскопия и прочность материалов. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 1996. — С. 52—63.
17. Вербило Д. Г. Особенности расчета истинных кривых нагружения при кручении // Проблемы прочности. — 2011. — № 3. — С. 110—123.

### **Міцність і пластичність мідних прутків, підданих одно- і різноспрямованому крученню**

Ю. М. Подрезов, Є. Г. Пашинська, Д. Г. Вербило, М. А. Кралюк,  
М. І. Даниленко, І. Ю. Окунь

*Вивчено механічні властивості при розтягуванні і крученні мідного дроту, попередньо підданого крученню на різну кількість оборотів в прямому і зворотному напрямках. Встановлено немонотонний характер залежності механічних властивостей від ступеня попередньої деформації. Проведено фрактографічний аналіз поверхонь руйнування зразків. З аналізу фрактограм випливає, що зразок, продеформований в прямому напрямку на 25 оборотів, руйнується практично без шийки. Однак по мірі збільшення кількості зворотних оборотів схильність до шийкоутворення поступово відновлюється.*

**Ключові слова:** розтягування, кручення, деформуюче напруження, комбінована деформація.

### **The strength and ductility of copper bars subjected to unidirectional and multi-directional torsion**

Yu. N. Podrezov, E. G. Pashinskaya, D. G. Verbylo, M. A. Kraliuk,  
N. I. Danylenko, I. Yu. Okun

*The tensile and torsion mechanical properties of copper wire, previously subjected to torsion on the different number of turns in the forward and reverse direction was studied. It was found that the mechanical properties exhibit a non-monotonic character depending on the degree of pre-deformation. Fractographic analysis of surfaces of destruction of the samples was carried out. It is followed from the analysis of fraktogramm that samples deformed forward to 25 revolutions destroyed virtually no neck, but as the number of revolutions of inverse tendency to neck formation gradually restored.*

**Keywords:** tension, torsion, flow stress, the combined strain.