

## РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.77

Бейгельзимер Я. Е.  
Гусар Ю. В.  
Прилепо Д. В.  
Бахмацкий В. Д.  
Абрамова Е. А.  
Ткаченко Т. К.

### КАРТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Исследования последних 20 лет показали, что металлические материалы с субмикроструктурной (СМК) структурой, сформированной методами интенсивной пластической деформации (ИПД), существенно отличаются по своим свойствам от крупнокристаллических аналогов [1]. По сути, можно говорить о появлении новых материалов, с которыми связывают большие надежды в плане практического применения. Однако пока что эти ожидания оправдываются далеко не в полной мере. С нашей точки зрения, это во многом связано с неадекватной оценкой свойств СМК металлов.

Так, в работе [2] показано, что использование относительного удлинения до разрыва в качестве меры пластичности СМК металлов существенно занижает реальное значение этой важнейшей характеристики. Величина таких материалов определяется, в основном, показателем – относительным удлинением до образования шейки, а не способностью материала тормозить процесс разрушения. Для СМК металлов действительно мало, если не предприняты специальные дополнительные меры [3]. Но этот показатель важен лишь в случае, когда материал предназначен для работы в условиях одноосного растяжения. Если же предполагается его эксплуатация в условиях сжатия или кручения, например, то малые значения и не являются препятствием к его применению. В этих случаях сочетание высокой прочности с повышенной пластичностью (правильно оцененной [2]) дает СМК материалам значительные преимущества.

Адекватная оценка свойств СМК металлов важна еще и потому, что операции ИПД, как правило, сочетаются с формообразующими операциями ОМД и термообработкой. Поэтому для проектирования всей технологической цепочки обработки давлением таких материалов необходимо иметь представление об их свойствах в разных напряженно-деформированных состояниях (НДС).

Удобным средством отображения свойств и структуры материалов являются карты, введенные Michael F. Ashby в практику материаловедения [4, 5]. Суть таких карт в том, что на плоскости с заданными координатами выделяются характерные области с некоторыми общими свойствами. Например, в системе координат «касательное напряжение – гомологическая температура» определенного материала выделяются области с различными ведущими механизмами деформации или в координатах «предел прочности – плотность» выделяются области, соответствующие разным материалам и т. д. [5].

Указанные карты являются замечательным подспорьем при проектировании конструкций и материалов. Они, с одной стороны, позволяют выбрать наиболее подходящий материал для тех или иных условий эксплуатации, а с другой – выявляют «белые пятна», т. е. области для которых необходима разработка новых материалов.

В научной литературе известны примеры использования подхода материаловедческих карт для характеристики структуры и свойств СМК материалов. Так, авторы работы [6] нанесли на плоскость с координатами «предел прочности – относительное удлинение до разрыва» свойства некоторых металлов в различных структурных состояниях. Такое построение наглядно показало, что СМК металлы перспективно использовать в случаях, когда требуется сочетание высокой прочности с повышенной пластичностью.

Цель данной работы – расширить представление о материаловедческих картах в применении к СМК металлам с целью отражения зависимости их свойств от показателей напряженно-деформированного состояния.

Исследования в области ОМД выявили [7–9], что предельная пластичность металлов существенно зависит от показателей жесткости и вида напряженного состояния. Ниже мы показываем, что не только пластичность, но и кривые «напряжение – деформация» СМК меди при растяжении и кручении отличаются кардинально. Это означает, что СМК металлы чрезвычайно чувствительны к характеристикам НДС, и адекватная оценка их свойств невозможна без учета этого фактора.

В качестве материала для исследований была выбрана медь следующего химического состава (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав меди в %

Mg	Al	P	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	Sb	Pb	Bi
0,04	0,11	0,03	0,02	0,03	0,01	0,06	99,5	0,02	0,04	0,08	0,03	0,03

Исходный горячекатаный пруток диаметром 50 мм, в целях экономии материала, подвергался ковке до сечения  $19 \times 29$  мм. Полученная заготовка разрезалась на мерные длины, после чего производилась фрезеровка до сечения  $18 \times 28$  мм. Далее материал подвергся термической обработке в печи при  $t = 550$  °С в течение 1 часа для снятия остаточных напряжений.

Деформационная обработка меди осуществлялась методом винтовой экструзии. Температура деформации – комнатная. По 3 заготовки обрабатывали 1 и 7 проходами винтовой экструзии. Параметры канала винтовой матрицы приведены на рис. 1.

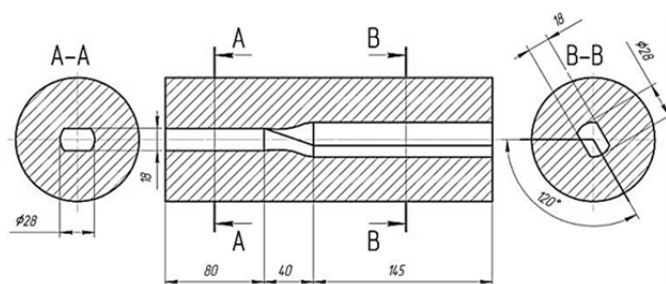


Рис. 1. Эскиз канала винтовой матрицы

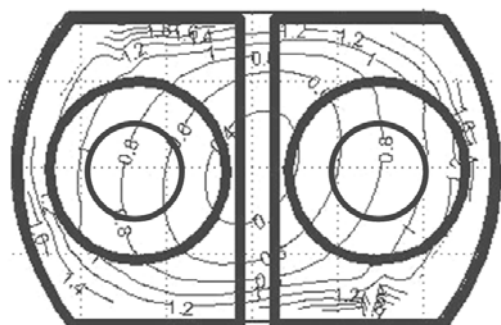


Рис. 2. Схема раскроя заготовки после ВЭ

Скорость движения заготовки вдоль оси экструзии – 3 мм/с, величина противодействия – 200 МПа.

Заготовки после ВЭ разрезались на электроэрозионном станке по схеме, показанной на рис. 2. Далее из них изготавливались образцы для испытаний на кручение и разрыв (рис. 3), согласно ГОСТ 3565-80 «Металлы. Метод испытания на кручение» и ГОСТ 1497-84 «Методы испытаний на растяжение». Из каждого образца, подвергнутого ВЭ, получались два образца для испытаний: один на кручение и один на растяжение. Нанесены изолинии деформации Мизеса, полученной заготовкой за один проход ВЭ. Распределение деформации найдено экспериментально-расчётным методом [10].

Рис. 2 показывает, что деформация Мизеса в пределах рабочей части образцов в среднем составляла 0,75 за один проход.



Рис. 3. Эскизы образцов для испытания кручением (а) и растяжение (б)

Испытание на растяжение проводилось на структурно-деформационном комплексе АЛА-ТОО-Р50. Испытание на кручение производилось на стенде, разработанном в ДонФТИ НАН Украины и предназначенном для исследования свойств наноструктурных материалов при упруго-пластических деформациях, а также для моделирования процессов получения таких материалов методом ИПД (рис. 4). Стенд обеспечивает измерение и компьютерную регистрацию во времени величины вращающего момента и осевого линейного удлинения образца (Free-End Torsion test [2–4]).



Рис. 4. Общий вид стенда

Измерительный контроллер выполняет функции сигнального процессора реального времени, и обеспечивает измерение сигнала момента с тензомоста, фильтрацию сигнала, буферизацию и передачу данных на серверный компьютер. Частота дискретизации сигнала от 0,5 до 20000 Гц. Подключение – USB порт.

Для измерения удлинения используется индикатор 1МИГЦ. Подключение – USB порт.

Серверный компьютер выполняет регистрацию и отображение графиков измеряемых функций.

Разработано специализированное программное обеспечение для компьютерной регистрации сигналов измерительных датчиков, момента и удлинения образца с визуализацией графиков на экране компьютера в режиме реального времени (платформа Windows).

Основные функции программного обеспечения:

- поддержка работы USB порта для работы с измерительным контроллером;
- прием и буферизация входных данных;
- визуализация текущих измерений, регистрация и визуализация контролируемых значений в реальном масштабе времени;
- редактирование измеренных значений;
- фильтрация входного сигнала различными методами для увеличения информативности.
- калибровка входов и экспресс обработка результатов измерений.

Параметры стенда:

- Прямое и реверсное нагружение кручением;
- Максимальная длина образца, мм – 80;
- Максимальный крутящий момент, Нм – 50;
- Погрешность измерения момента, % – 0,2;
- Максимальное удлинение образца, мм – 10;
- Погрешность измерения удлинения образца, мм – 10–3;
- Минимальная угловая скорость вращения, рад/сек – 0,0001;
- Максимальная угловая скорость вращения, рад/сек – 0,0005.

На рис. 5 представлены результаты испытаний образцов на разрыв. В условных координатах (рис. 5, а) диаграммы растяжения меди после обработки ВЭ имеют характерный вид [1], на первый взгляд, свидетельствующий о малой пластичности СМК материалов. На самом же деле, как показано в работе [2], ранняя локализация деформации в этих материалах при

одноосном растяжении связана лишь с особенностями их упрочнения, а не с пластичностью. Об этом свидетельствует рис. 5, б, где те же данные представлены в истинных координатах (расчет истинных значений деформации и напряжения в шейке выполнен по методике работы [2]).

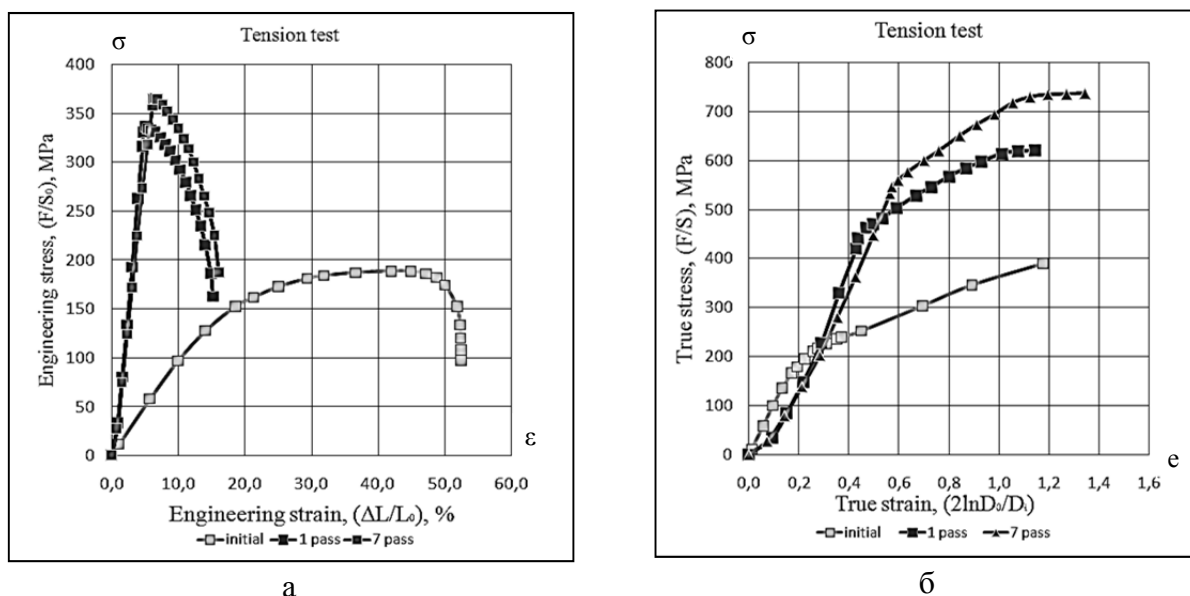


Рис. 5. Результаты испытаний на разрыв в условных (а) и истинных координатах (б)

На рис. 6 приведено сопоставление результатов испытаний на разрыв и на кручение в истинных координатах. Хорошо видно, что для крупнокристаллической меди, до деформации порядка 1, зависимости напряжение-деформация при растяжении и кручении довольно близки, что соответствует гипотезе «единой кривой течения». Для меди обработанной винтовой экструзией ход указанных кривых отличается кардинально, что свидетельствует о чувствительности материала к виду нагружения.

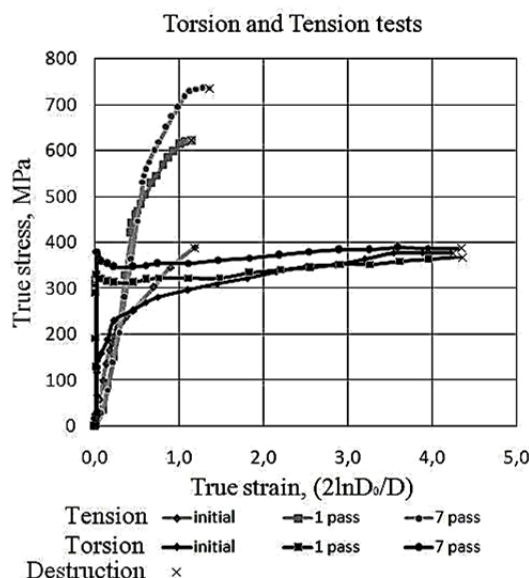


Рис. 6. Сопоставление результатов испытаний на разрыв и кручение в истинных координатах

Именно по этой причине мы предлагаем учитывать параметры НДС при характеристике механических свойств СМК материалов и отображать это на материаловедческих картах. С нашей точки зрения, в качестве основы таких карт может быть положена диаграмма видов напряженного состояния С. И. Губкина [11].

## ВЫВОДЫ

Исследования субмикроструктурных металлов сейчас проводят в очень ограниченной области напряженно-деформированного состояния, что не позволяет адекватно охарактеризовать их свойства. Применение материаловедческих карт позволит грамотно спланировать исследования и емко представить весь спектр свойств этих новых материалов.

Авторы благодарят Государственное агентство по вопросам науки, инноваций и информатизации Украины за финансовую поддержку работы в рамках совместного украино-корейского научно-исследовательского проекта М386-2011.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р. З. *Объемные наноструктурные металлические материалы* / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – Г. : ИКЦ Академкнига, 2007. – 398 с.
2. *Measures of Ductility for UFG Materials Obtained by SPD* / Y. Beygelzimer, O. Prokof'eva, R. Kulagin, V. Varyukhin, S. Synko // *Materials Science Forum*. – 2010. – V. 633–634. – P. 223–230.
3. *Processing, Strength and Ductility of Bulk Nanostructured Metals Produced by Severe Plastic Deformation: An Overview* / A. Mashreghi, L. Ghalandari, M. Reihanian, M. M. Moshksar // *Materials Science Forum*. – 2010. – V. 633–634. – P. 131–135.
4. Фрост Г. Дж. *Карты механизмов деформации* / Г. Дж. Фрост, М. Ф. Эшби; пер. с англ. Л. М. Бернштейна. – Челябинск : *Металлургия, Челябинское отделение*, 1989. – 328 с.
5. Michael F. Ashby *Materials Selection in Mechanical Design (3rd Edition)* / F. Michael. – Elsevier, Amsterdam, 2008. – 603 p.
6. Valiev R. Z. *Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation* / R. Z. Valiev, I. V. Alexandrov, Y. T. Zhu // *J. Mater. Res.* – 2002. – Vol. 17, No. 1. – P. 5–8.
7. Kolmogorov V. L. *On the history of the determination of ductile fracture (ductility) of metal* / V. L. Kolmogorov // *J. Mater. Process. Technol.* – 1997. – № 70. – P. 190–193.
8. Огородников В. А. *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением* / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 176 с.
9. Огородников В. А. *Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнических экспертизы)* : монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак; Винницкий национальный технический университет. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
10. *Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method* / Y. Beygelzimer, A. Reshetov, S. Synkov, O. Prokof'eva, R. Kulagin // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – № 209. – P. 3650–3656.
11. Губкин С. И. *Пластическая деформация металлов* / С. И. Губкин. – М. : *Металлургия*. – 1 том. – 376 с.

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;

Гусар Ю. В. – аспирант ДонФТИ НАНУ;

Прилепо Д. В. – мл. науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;

Бахмацкий В. Д. – науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;

Абрамова Е. А. – мл. науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;

Ткаченко Т. К. – инженер ДонФТИ НАНУ.

ДонФТИ НАНУ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина  
Национальной академии наук Украины, г. Донецк.

E-mail: yanbeygel@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13.01.2012 г.