

УДК 539.89: 538.911+537.31+539.424+539.52

Давиденко А. А.
Сенникова Л. Ф.
Дмитренко В. Ю.

ДЕФОРМАЦИОННАЯ ПОРИСТОСТЬ ПРУТКОВ МЕДИ М06 ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В работе исследована деформационная пористость прутков из меди марки М06 (99,99%) после интенсивной пластической деформации (ИПД) методами гидроэкструзии (ГЭ) и угловой гидроэкструзии (УГЭ). Показано, что использование УГЭ при обработке меди позволило снизить дефектность материала, по сравнению с гидроэкструзией, и повысить его функциональные свойства.

Известно, что методы интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяют обрабатывать материалы с большими степенями деформаций в условиях высоких приложенных напряжений. В чистых металлах и ряде сплавов ИПД обеспечивают формирование ультрамелкозернистой структуры с размерами зерен до 100–200 нм. Однако сформировавшиеся зерна имеют специфическую субструктуру с присутствием зернограничных и решеточных дислокаций и наличием больших упругих искажений кристаллической решетки. Большая плотность дислокаций в границах зерен и искажения кристаллической решетки за счет действующих упругих напряжений могут привести к дефектности материала, а именно, к образованию микропор и микротрещин, которые способствуют разрушению материала. Поэтому исследования влияния ИПД на дефектность структуры и свойства материалов являются актуальными.

В настоящее время известно ряд работ по изучению поврежденности меди и других материалов в результате обработки методом равноканального углового прессования (РКУП). В работе [1] исследовалось влияние равноканального углового прессования с противодействием на деформационную пористость в меди М06 (99,99%). После 4 проходов РКУП без противодействия в образцах наблюдалась пористость, с применением же противодействия 200 МПа пористость обнаружена не была. Однако при дальнейшем увеличении числа проходов до 8 и 12 РКУП с противодействием пористость снова появлялась. Авторы вышеуказанной работы считают, что противодействие способно подавлять пористость только на начальных этапах деформации, а для большого числа проходов РКУП этот механизм перестает быть эффективным.

В работе [2] исследовалось образование пористости в титане в результате РКУП с использованием различных деформационных схем (маршрутов). Применение противодействия по схеме А, как правило, способствует уменьшению объемной доли дефектов всех размеров. РКУП по схеме В_c (4 прохода) без противодействия увеличивает объем дефектов менее 15 нм, а объем дефектов размером более 15 нм значительно уменьшается. Применение противодействия по схеме В_c не влияет на количество дефектов.

С помощью методов малоуглового рассеяния нейтронов (SANS) и просвечивающей электронной микроскопии было установлено возникновение наноразмерной пористости в титане коммерческой чистоты после обработки РКУП. Исследовались образцы после 1–4 проходов РКУП с противодействием от 0 до 175 МПа. Замечено, что РКУП с противодействием приводит к уменьшению среднего размера пор, который также зависит от маршрута обработки.

Цель настоящей работы – определить влияние прямой гидроэкструзии (ГЭ) и угловой гидроэкструзии (УГЭ) на образование деформационной пористости в меди М06 и ее влияние на свойства материала.

Исходным материалом настоящего исследования служили промышленные горяче-прессованные прутки из чистой бескислородной меди марки М06 (99,99%) диаметром 50 мм.

Деформационную обработку заготовок исходного диаметра осуществляли при комнатной температуре по двум схемам: 1 – прямая гидроэкструзия (ГЭ) и 2 - угловая гидроэкструзия (УГЭ) (Рис. 1). Отличительной особенностью методов ГЭ и УГЭ является использование жидкости высокого давления для выдавливания заготовки из контейнера. Технологические приемы обработки подробно описаны в работе [3].

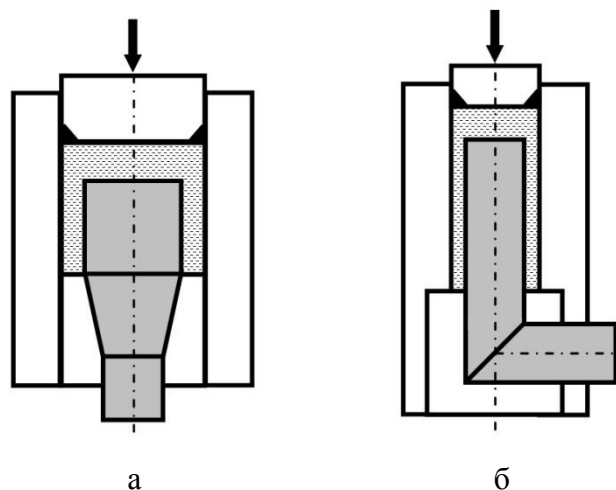


Рис. 1. Схемы установок для деформационной обработки заготовок методами гидроэкструзии (а) и угловой гидроэкструзии (б)

Первая схема включала отжиг ($600^{\circ}\text{C} - 1$ час) исходной заготовки диаметром 50 мм и ее ГЭ до диаметра 6,2 мм. По второй схеме, исходный пруток диаметром 50 мм распускался на 4 части, из которых, соответственно, вырезали 4 заготовки диаметром 13 мм, отжигали их при температуре $600^{\circ}\text{C} - 1$ час и делали от 1 до 5 проходов УГЭ по схеме В_с [1] (с поворотом заготовки вокруг своей продольной оси на 90° в одном направлении). После каждого прохода на образцах, как в первом, так и во втором случаях, проводились исследования структуры и свойств.

Термическую обработку образцов проводили в лабораторной печи СНОЛ-7,2/1100.

Дефектную структуру (микропоры, микротрещины), свойства образцов в исходном состоянии и после деформации анализировали методами дюриметрических (твердомер Виккерса HV-5), волюметрических (весы SHIMADZU) исследований, растровой электронной микроскопии (JEOL JSM-6490), измерениями электросопротивления по четырехточечной схеме.

Сканирование поверхности поперечного шлифа медных прутков, начиная с диаметра 13 мм, проводили при помощи растровой электронной микроскопии (РЕМ) в ВЕС-режиме с шагом 1 мм, на малых диаметрах (6-4 мм) с шагом 0,5 мм.

Данные исследований твердости и плотности образцов по переходам в зависимости от степени накопленной логарифмической деформации ϵ представлены на рис. 2.

На начальном этапе деформирования, как для первой схемы, так и для второй, происходит традиционное ожидаемое изменение твердости и плотности: твердость повышается, а плотность материала немного снижается. При дальнейшем увеличении степени деформации ГЭ твердость и плотность материала остаются практически на одном уровне. После УГЭ уровень плотности, с увеличением числа проходов, не меняется, а твердость повышается.

Исследования структуры подтвердили результаты, полученные ранее на проволочных образцах [4], что в схемах с использованием УГЭ наблюдается существенное уменьшение общего количества пор, и за счет этого, по-видимому, происходит некоторое повышение твердости.

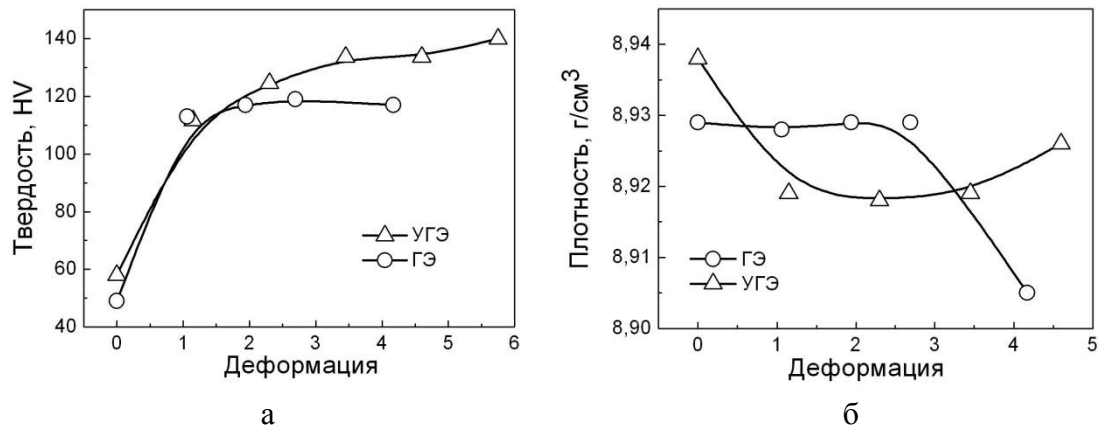


Рис. 2. Изменение твердости (а) и плотности (б) образцов меди М06 в зависимости от степени накопленной логарифмической деформации при ГЭ и УГЭ

На рис. 3 представлена типичная картина пористости медного прутка диаметром 13 мм после ГЭ и УГЭ.

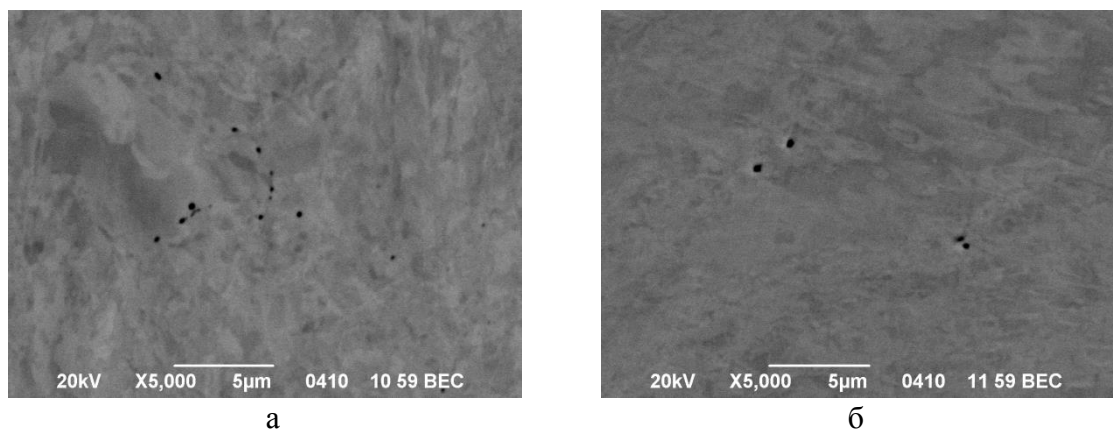


Рис. 3. Растровая электронная микроскопия поперечного сечения прутка меди М06 диаметром 13 мм:

а – после ГЭ ($e=2,6$); б – после УГЭ ($e=2,3$)

Однако, наличие распределения несплошностей по размерам затрудняет количественную оценку степени поврежденности материала, поэтому для этой цели использовали измерение деформационного разуплотнения (дефекта плотности, $\Delta\rho/\rho$), которое характеризует интегральный объем несплошностей всех размеров [5]. Деформационное разуплотнение может быть связано также с дислокациями, вакансиями, ориентированными микронапряжениями. В работе [6] был оценен вклад различных факторов в разуплотнение чистого Al, деформированного растяжением. Оказалось, что вклад от дислокаций составляет менее $3 \cdot 10^{-6}$ г/см³, вклад от ориентирования микронапряжений – $(2-4) \cdot 10^{-6}$ г/см³, от равновесных вакансий – $5 \cdot 10^{-13}$ г/см³. Поэтому, учитывая весьма незначительный вклад этих дефектов кристаллической решетки в деформационное разуплотнение материала, далее речь пойдет только о микронесплошностях.

Исследования показали, что при больших пластических деформациях ($e \geq 1$), использование УГЭ при обработке меди способствует уменьшению интегрального объема несплошностей всех размеров в исследуемых образцах, тогда как ГЭ приводит к его увеличению (рис. 4).

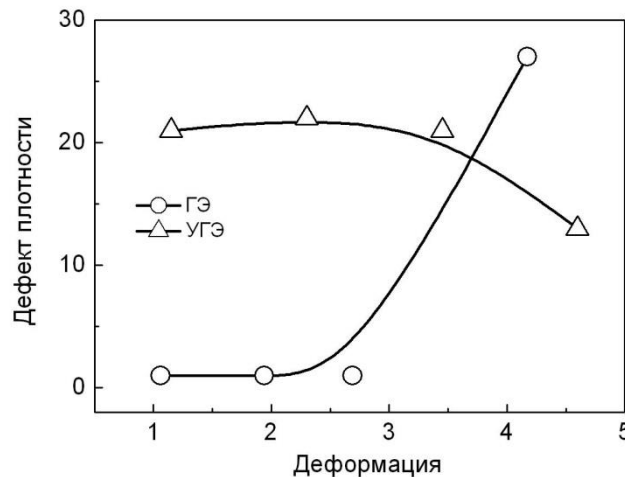


Рис. 4. Дефект плотности в меди М06 при монотонной (ГЭ) и немонотонной (УГЭ) схемах деформирования

Известно, что важную роль при развитии и слиянии несплошностей играют размеры структурной гетерогенности (блоков, зерен), которые оказывают тормозящее влияние на процесс разрушения на макро- и микроуровнях [5]. Поэтому можно предположить, что существенное уменьшение количества микропор в меди при использовании УГЭ происходит за счет получения ультрамелкозернистой структуры и, следовательно, большей протяженности границ зерен, которые сдерживают образование новых несплошностей и тормозят развитие уже существующих.

Поры, как и другие структурные несовершенства, приводят к повышению электросопротивления материалов [7] вследствие возникновения больших искажений структуры. Так как деформация УГЭ в нашем случае уменьшает количество микропор, то вызывает интерес количественная оценка уровня электросопротивления образцов, полученных ГЭ и комбинацией УГЭ и ГЭ. Исследовались образцы после ГЭ прутка с диаметра 50 мм до диаметра 4 мм и образцы после 4 проходов УГЭ прутка диаметра 13 мм с последующей его ГЭ до диаметра 4 мм. Параметры эксперимента по определению электросопротивления образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Электросопротивление образцов меди М06 после разных схем обработки

ГЭ			4 УГЭ + ГЭ		
Диаметр d , мм	Накопленная деформация, Σe	Электро-сопротивление ρ , мкОм·см	Диаметр d , мм	Накопленная деформация, Σe	Электро-сопротивление ρ , мкОм·см
15,0	2,4	1,789	13,0	4,6	1,793
9,4	3,3	1,797	9,4	5,3	1,790
6,2	4,1	1,795	6,2	6,1	1,795
4,0	5,0	1,803	4,0	7,0	1,803

Видно, что с повышением степени деформации электросопротивление увеличивается в образцах, полученных, как с применением УГЭ, так и без нее. Однако, уровень электросопротивления образцов практически одинаков для этих двух схем пластической деформации, несмотря на более высокую степень деформации в случае использования УГЭ. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что одним из факторов препятствующему дальнейшему росту электросопротивления в сильнодеформированных образцах после УГЭ, может быть и уменьшение их пористости.

ВЫВОДЫ

Использование метода угловой гидроэкструзии в технологической схеме деформационной обработки бескислородной меди М06 способствует уменьшению интегрального объема несплошностей в образцах и позволяет получить высокопрочный материал с хорошей электропроводностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Divinski S. *Effect of back pressure during equal-channel angular pressing on deformation-induced porosity in copper* / J. Ribbe, G. Schmitz, M. Rosner, R. Lapovok, Y. Estrin, G. Wilde // *Scripta Mater.* – 2013. – Vol. 68. – № 12. – P. 925–928.
2. *Evolution of nanoscale porosity during equal-channel angular pressing of titanium* / R. Lapovok, D. Tomus, J. Mang, Y. Estrin, T.C. Lowe // *Acta Mater.* – 2009. – Vol. 57. – № 10. – P. 2909–2918.
3. *Effect of combining the equal-channel angular hydroextrusion, direct hydroextrusion and drawing on properties of copper wire* / V. Spuskanyuk, O. Davydenko, A. Berezina, O. Gangalo, L. Sennikova, M. Tikhonovsky, D. Spiridonov // *J. Mater. Process. Technol.* – 2010. – Vol. 210. – P. 1709–1715.
4. *Поврежденность медной проволоки в процессе больших пластических деформаций* / Л.Ф. Сенникова, А.А. Давиденко, В.З. Спусканюк, В.В. Бурховецкий, К.И. Слива, Т.А. Закорецкая // *Вопросы материаловедения.* – 2014. – Т. 80. – № 4 – С 73–78.
5. *Черемской П.Г. Поры в твердом теле* / П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
6. *Баранов Ю.В. Импульсные технологии обработки наноструктурных материалов с целью заличивания дефектов* / Ю.В. Баранов, Г.Ж. Сахвадзе, В.В. Столяров // *Вестник научно-технического развития.* – 2010. – №10 (38). – С.12–15.
7. *Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках* / К. Л. Чопра. – М.: Мир, 1972. – 220 с.

REFERENCES

1. Divinski S. *Effect of back pressure during equal-channel angular pressing on deformation-induced porosity in copper* / J. Ribbe, G. Schmitz, M. Rosner, R. Lapovok, Y. Estrin, G. Wilde // *Scripta Mater.* – 2013. – Vol. 68. – № 12. – P. 925–928.
2. *Evolution of nanoscale porosity during equal-channel angular pressing of titanium* / R. Lapovok, D. Tomus, J. Mang, Y. Estrin, T.C. Lowe // *Acta Mater.* – 2009. – Vol. 57. – № 10. – P. 2909–2918.
3. *Effect of combining the equal-channel angular hydroextrusion, direct hydroextrusion and drawing on properties of copper wire* / V. Spuskanyuk, O. Davydenko, A. Berezina, O. Gangalo, L. Sennikova, M. Tikhonovsky, D. Spiridonov // *J. Mater. Process. Technol.* – 2010. – Vol. 210. – P. 1709–1715.
4. *Povrezhdennost' mednoj provoloki v processe bol'shikh plasticheskikh deformatsij* / L.F. Sennikova, A.A. Davidenko, V.Z. Spuskanyuk, V.V. Burhoveckij, K.I. Sliva, T.A. Zakoreckaja // *Voprosy materialovedenija.* – 2014. – Т. 80. – № 4 – С 73–78.
5. *Cheremskoj P.G. Pory v tverdom tele* / P.G. Cheremskoj, V.V. Slezov, V.I. Betehtin. – М.: Jenergoatomizdat, 1990. – 376 s.
6. *Baranov Ju.V. Impul'snye tehnologii obrabotki nanostrukturnykh materialov s cel'ju zalechivaniya defektov* / Ju.V. Baranov, G.Zh. Sahvadze, V.V. Stoljarov // *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitija.* – 2010. – №10 (38). – С. 12–15.
7. *Chopra K.L. Jelektricheskie javlenija v tonkih plenkah* / K. L. Chopra. – М.: Mir, 1972. – 220 s.

Давиденко А. А. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ДонФТИ

Сенникова Л. Ф. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ДонФТИ

Дмитренко В. Ю. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ДонФТИ

ДонФТИ – Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина НАН Украины, г. Киев.

E-mail: dav76@ukr.net

Статья поступила в редакцию 29.02.2016 г.