

PACS: 81.40.-z

Г.И. Рааб, К.Н. Макарычев, Р.З. Валиев

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ  
С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ

Институт физики перспективных материалов,  
Уфимский государственный авиационный технический университет  
ул. К. Маркса, 12, г. Уфа, 450000, Россия  
Email: k\_makarychev@mail.ru

*Целью работы являлось изучение влияния параметров обработки на характеристики и поведение ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) медной заготовки методом сеток и методом конечных элементов (МКЭ) при равноканальном угловом прессовании с противодавлением (РКУПП) и без него (РКУП). Максимальный уровень противодействия для исследуемого материала меди марки М1 составлял 450 МПа. В результате исследования получены численные значения уровня накопленной деформации в продольном и поперечном диаметральных сечениях заготовки, а также сравнительные данные параметров НДС при прессовании в условиях противодействия и без него. Выявлены особенности НДС в очаге деформации и его влияние на деформируемость меди при создании противодействия жестким пуансоном и ее механическое поведение в УМЗ-состоянии.*

**Введение**

На формирование УМЗ-структуры при РКУП большое влияние оказывают параметры прессования [1]. К наиболее важным параметрам при РКУП относятся НДС и маршрут прессования [1]. Об этом также свидетельствуют работы [2,3], в которых показана тенденция получения более мелких зерен и дальнейшего повышения прочности УМЗ-меди при использовании противодействия. Вызывает интерес, какое же влияние оказывает противодействие на деформационное поведение и деформированное состояние заготовок. Учитывая, что существует прямая зависимость между деформированным состоянием и структурными изменениями в материалах, необходимость подобных исследований является актуальной. Также следует учитывать положительное влияние высокого уровня гидростатического давления в условиях, близких к всестороннему сжатию, на деформируемость материалов. Это обстоятельство должно приводить к повышенной деформируемости при

РКУПП [4]. Обозначенные проблемы были предметом исследований и представляли интерес с точки зрения влияния противодействия на однородность деформированного состояния и деформируемость заготовок.

### Методика эксперимента и основные результаты

Исследование деформированного состояния при РКУП проводили на стадии устойчивого течения материала. Для эксперимента брали заготовки размерами  $16 \times 16 \times 100$  mm из меди марки М1. При изучении деформированного состояния использовали методику, базирующуюся на положениях теории конечных деформаций, где параметры деформированного состояния определяются при сопоставлении исходных и конечных форм и параметров ячейки. Координатную сетку ( $4 \times 4$  mm) наносили механическим способом на одну из равных частей заготовки, разрезанную в продольной вертикальной или горизонтальных плоскостях (рис. 1).

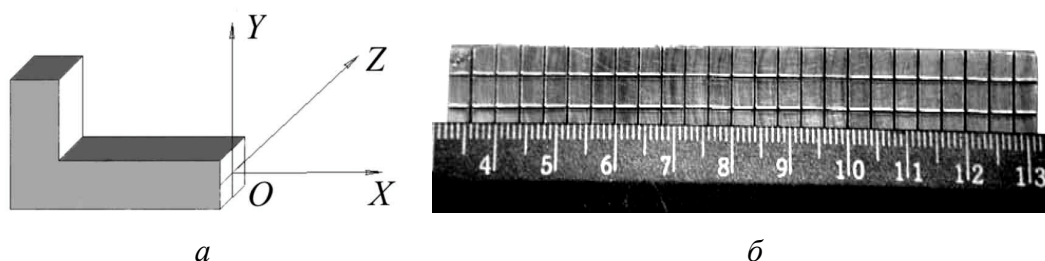


Рис. 1. Схема разрезки с указанием исследуемых плоскостей (а) и общий вид исходной координатной сетки (б)

Физическое состояние материала и работу, затрачиваемую на формоизменение, характеризовали интенсивностью деформации сдвига [1]:

$$\Gamma = \sqrt{2} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} \quad (1)$$

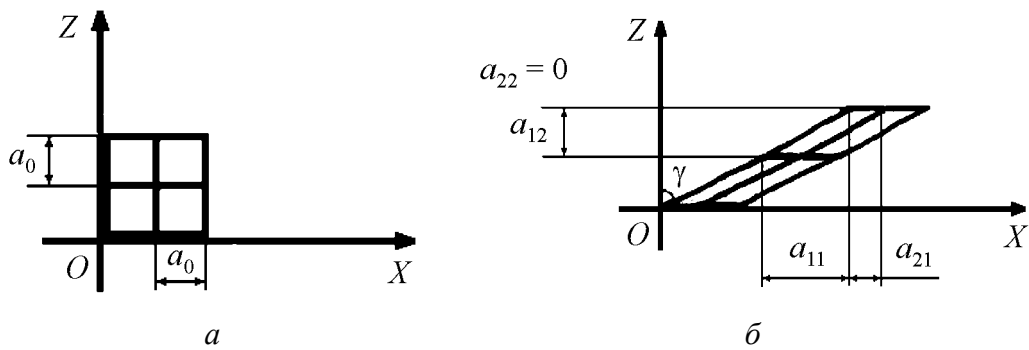
или накопленной деформацией

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}, \quad (2)$$

где  $\Gamma$  – интенсивность деформации сдвига;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные деформации;  $\varepsilon_i$  – истинная накопленная деформация.

Главные деформации определяли по изменению координат делительной сетки по методике, представленной в [1] (рис. 2). Результаты, полученные по вышеописанной методике, сравнивали с результатами, полученными по методике, представленной в [1], где интенсивность деформации определяли по углу наклона ячеек сетки после деформации

$$\Gamma = \operatorname{tg} \gamma. \quad (3)$$



**Рис. 2.** Общий вид ячеек координатной сетки до (а) и после (б) деформации для стадии устойчивого течения материала (медь марки М1) в продольной вертикальной диаметральной плоскости после одного цикла прессования (где  $a_0$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{21}$  – параметры измененной ячейки,  $\gamma$  – угол ее наклона)

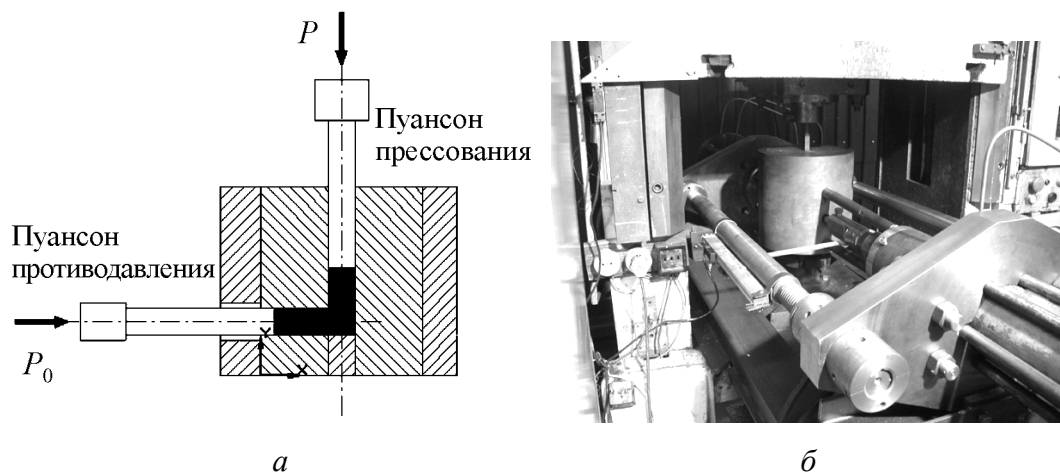
Гидростатическое давление в очаге деформации при РКУП определяли согласно [5] по формуле

$$p = \frac{p_0 + k(\mu + \text{ctg}\Phi)}{1 - \mu \text{ctg}\Phi}, \quad (4)$$

где  $p_0$  – величина осевого противодействия со стороны выходного канала, создаваемого жестким пуансоном;  $k$  – предел текучести материала;  $\mu$  – коэффициент трения на рабочих поверхностях матрицы;  $\Phi$  – половина угла пересечения каналов (в данном случае  $45^\circ$ ).

### Основные результаты и их обсуждение

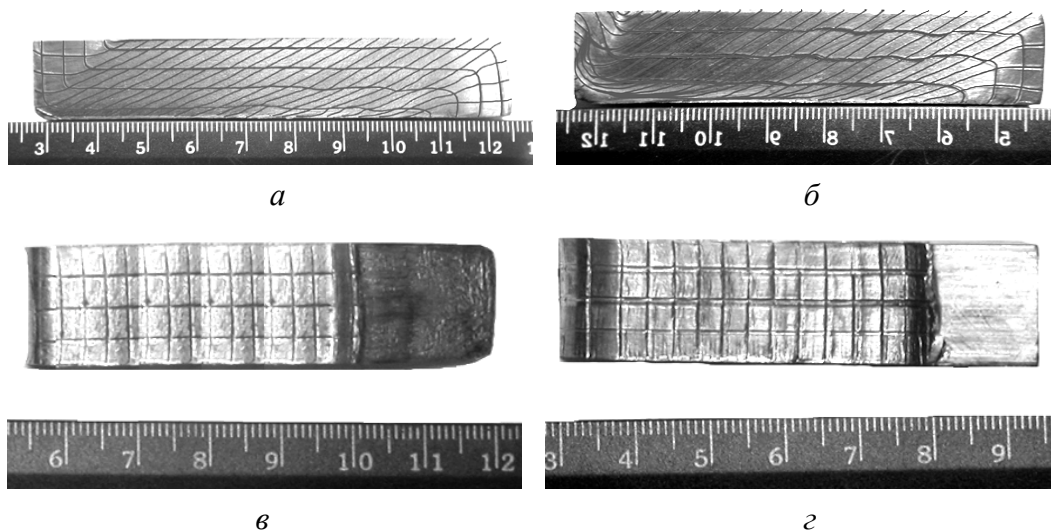
Для проведения экспериментов была создана установка для РКУПП с максимальной силой противодействия 900 МПа. Ее схема и общий вид представлены на рис. 3. Установка оснащена компьютерным управлением.



**Рис. 3.** Установка для РКУПП: а – схема оснастки, б – общий вид

*Исследование НДС заготовок*

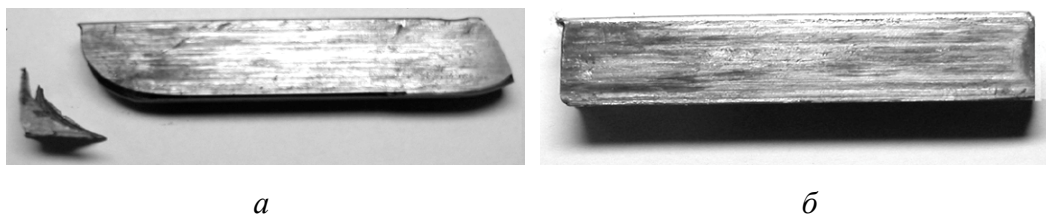
В результате исследований получены деформационные картины после одного цикла РКУП и РКУПП меди (рис. 4).



**Рис. 4.** Общий вид координатной сетки после одного цикла прессования медной заготовки в сечениях  $XOY$  (*a*, *б* – соответственно после РКУП и РКУПП) и  $ZOX$  (*в*, *г* – после РКУП и РКУПП)

Форма заготовки, представленная на рис. 5,*a*, получена после 5 циклов РКУП. Она свидетельствует о том, что в процессе деформации может отделяться часть заготовки, находящаяся в застойной зоне оснастки. Срез заготовки происходит по наиболее естественному пути течения металла, отвечающему действиям максимальных сдвиговых напряжений. Полученная после деформации форма сетки (см. рис. 4,*a*) также свидетельствует о срезе части материала на начальной стадии прессования. При этом в момент среза и некоторое время после него нижний ряд ячеек приобретает неправильную форму, искажаются верхние ряды ячеек, и только ближе к завершению процесса наблюдается стабилизация течения.

При создании противодействия отделение части заготовки не происходит, однако застойная зона притормаживает течение металла в приконтактной нижней зоне заготовки. Эта зона определяется по резкому изменению наклона ячеек сетки (рис. 4,*б*). Она расположена в нижней части исследуемого



**Рис. 5.** Формы медной заготовки после 5 циклов РКУП (*a*) и 28 циклов РКУПП (*б*)

сечения и составляет около 20% от общего объема заготовки. При этом неоднородность деформации возрастает и в нижней приконтактной зоне примерно в два раза превышает значения накопленной деформации относительно остальной части заготовки на стадии устойчивого течения. Судя по виду сетки, срез заготовки, по-видимому, все-таки происходит, но из-за большого гидростатического давления и условий всестороннего сжатия имеет место залечивание образующихся трещин.

Анализ картин координатной сетки после деформации в плоскости  $ZOX$  (рис. 4, в, г) указывает на более однородное течение материала в этом сечении при использовании противодействия.

Оценки НДС процессов для устойчивой стадии прессования представлены в табл. 1. Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что при РКУП получено более равномерное деформационное поле. Однако в приконтактной нижней зоне накопленная деформация ниже, чем в остальной заготовке. При использовании РКУПП для этой зоны получена обратная картина.

Таблица 1  
Значения истинных деформаций для стадии устойчивого течения при РКУП и РКУПП после одного цикла

Вид обработки	Накопленная истинная деформация			Гидростатическое давление в очаге деформации, МПа
	центральной части заготовки в плоскости $YOX$	в нижней приконтактной зоне плоскости $YOX$	в плоскости $ZOX$	
РКУП	1.13	0.90	0.02	780
РКУПП	1.10	2.10	0.05	1204

### *Влияние противодействия на деформируемость материалов*

Деформируемость меди в процессе РКУП и РКУПП оценивали для маршрута Вс, как наиболее эффективного для формирования УМЗ-структуры. При РКУП заготовка до момента разрушения выдержала 20 циклов прессования. Общий вид заготовки с трещиной в направлении плоскости сдвига после 20 циклов представлен на рис. 6. Полученный вид разрушения наиболее характерен для процесса РКУП.



Рис. 6. Заготовка после 20 циклов РКУП по маршруту Вс

При РКУПП деформируемость меди значительно выше. После 28 циклов прессования не наблюдалось даже признаков, свидетельствующих о возможном разрушении. Наиболее важным признаком является возникновение «гребенки» на верхней поверхности образца. Нами же получен образец с абсолютно ровными поверхностями (см. рис. 5,б). Дальнейшее деформирование было приостановлено.

Похожие результаты были получены при обработке малопластичных высокопрочных алюминиевых сплавов типа 6061. Если без противодействия материал разрушался после второго цикла прессования, то при использовании противодействия силой около 600 МПа – только после 5–6 циклов.

### Механическое поведение УМЗ-меди

Влияние противодействия на механическое поведение меди было изучено для маршрута прессования Вс (табл. 2). При этом сравнивали состояния, полученные после 1, 4 и 16 циклов РКУП и РКУПП. Машинные графики нагрузка–перемещение при испытании на растяжение стандартных образцов диаметром 3 мм представлены на рис. 7.

Таблица 2

Результаты механических испытаний при температуре 20°C и скорости растяжения 1 mm/min меди М1 после РКУП и РКУПП по маршруту Вс

Вид обработки	Число циклов	Предел текучести, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Отжиг	–	100	145	40
РКУП	1	307	318	11
	4	404	422	10
	16	380	400	13
РКУПП	1	291	302	10
	4	471	482	10
	16	414	425	12

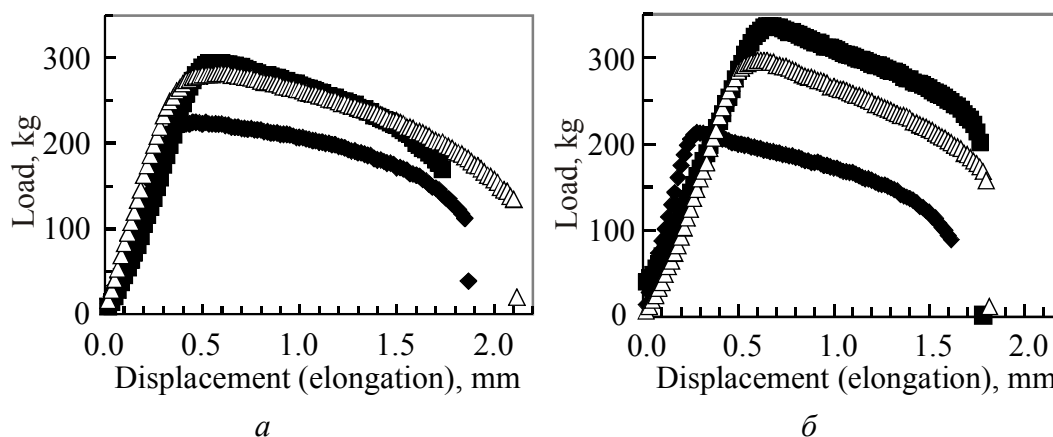


Рис. 7. Машинные графики нагрузка–перемещение при испытании на растяжение стандартных медных образцов диаметром 3 мм: а – после РКУП; б – после РКУПП: ♦ – 1 цикл, ■ – 4 цикла, Δ – 16 циклов

Анализ полученных результатов показывает, что противодействие способствует повышению общего уровня прочности. Максимальная разница наблюдается после 4 циклов и составляет 15% по сравнению с деформированием без противодействия (см. табл. 2). Такой факт, видимо, закономерен и свидетельствует о более напряженной структуре и более острой текстуре для этого состояния. Анализ пластических характеристик позволяет проследить тенденцию к повышению пластических свойств для обоих видов обработки к 16 циклу прессования. При этом происходит некоторое снижение прочности. Данные факты свидетельствуют о происходящих процессах релаксации напряжений, структурных и текстурных изменениях.

Следует обратить внимание на тот факт, что уже после одного цикла прессования доля равномерной деформации при растяжении незначительна. В табл. 3 приведены вклады равномерной и локальной деформации для всех испытанных образцов.

Таблица 3

**Результаты исследования вкладов равномерной и локальной деформации при растяжении образцов из меди М1 после РКУП и РКУПП по маршруту Вс**

Вид обработки	Число циклов	Вклад деформации, %	
		равномерной	локальной
Отжиг	–	82	18
РКУП	1	4.5	95.5
	4	4	96
	16	6.5	93.5
РКУПП	1	2	98
	4	3	97
	16	4.2	95.8

Анализ полученных данных показывает, что по сравнению с РКУП при РКУПП доля равномерной деформации снижается. В то же время с увеличением количества циклов и соответственно накопленной деформации для обоих процессов прослеживается тенденция к увеличению вклада равномерной деформации.

**Заключение**

Использование противодействия силой, равной 450 МПа, при прессовании меди марки М1 приводит к повышению гидростатического давления в очаге деформации с 780 до 1204 МПа. При этом в приконтактной нижней области заготовки для стадии устойчивого течения возникает зона с неоднородно повышенной интенсивностью деформации относительно остальной части исследуемого сечения. Эта зона составляет около 20% от исследованного сечения заготовки.

При РКУПП повышается деформируемость меди и, соответственно, подавляются процессы трещинообразования. Использование противодействия

влияет на механическое поведение УМЗ-материалов, полученных РКУП. При противодействии силой, равной 450 МПа, возрастают характеристики прочности после 4 и 16 циклов. Также для этих условий прослеживаются тенденции по увеличению пластичности.

1. Р.З. Валиев, И.В. Александров, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).
2. Г.И. Рааб, Н.А. Красильников, И.В. Александров, Р.З. Валиев, ФТВД **10**, № 4, 73 (2000).
3. Г.И. Рааб, А.В. Боткин, И.В. Александров, А.В. Ошнуров, Р.З. Валиев, ФТВД **12**, № 4, 47 (2002).
4. Р.Е. Лаповок, Металлы № 1, 45 (2004).
5. Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др., Теория пластических деформаций металлов, Е.П. Унксов, А.Г. Овчинников (ред.), Машиностроение, Москва (1983).
6. V.S. Zhernakov, I.N. Budilov, G.I. Raab, et al., Scripta mater. **44**, 1765 (2001).
7. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, Процессы пластического структурообразования металлов, Навука і тэхніка, Минск (1994).

G.I. Raab, K.N. Makarychev, R.Z. Valiev

## FEATURES OF THE STRESSED-STRAINED STATE DURING THE EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING WITH BACKPRESSURE

Influence of parameters of pressure treatment on characteristics and behavior of ultrafine-grained (UFG) materials has been studied. The stressed-strained state (SSS) of copper billet has been investigated by net method and finite-element method during the equal-channel angular pressing with backpressure (ECAPBP) and without it (ECAP). For copper of quality M1 the maximum level of backpressure was 450 MPa. Numerical values of the level of accumulated strain in the diametrical cross- and longitudinal sections of the billet have been estimated, comparative data for SSS parameters during pressing under backpressure and without the same have been obtained. Peculiarities of the SSS at deformation site and its influence on deformability of copper during backpressure generation by rigid punch and on its mechanical behavior in the UFG-state have been revealed.

**Fig. 1.** Slitting scheme with the investigated planes shown (*a*) and general view of the initial coordinate net (*b*)

**Fig. 2.** General view of coordinate net cells before (*a*) and after (*b*) deformation for the stage of steady flow of material (copper of quality M1) in the longitudinal vertical diametrical plane past one cycle of pressing (where  $a_0, a_{12}, a_{22}, a_{11}, a_{21}$  – parameters of modified cell,  $\gamma$  – angle of its inclination)

**Fig. 3.** Plant for ECAPBP: *a* – attachment scheme; *b* – general view

**Fig. 4.** General view of coordinate net past one cycle of pressing copper billet in sections *XOY* (*a, b* – past ECAP and ECAPBP) and *ZOX* (*e, z* – past ECAP and ECAPBP)



**Fig. 5.** Shapes of copper billet past 5 cycles of ECAP (*a*) and 28 cycles of ECAPBP (*b*)

**Fig. 6.** Billet past 20 ECAP cycles by route Bc

**Fig. 7.** Machine-made load-displacement plots during tensile tests for standard copper samples, 3 mm in diameter: *a* – after ECAP; *b* – after ECAPBP: ♦ – 1 cycle, ■ – 4 cycles, Δ – 16 cycles