

УДК 539.3

**Prospects of development of new pilot-commercial  
SPD methods**

**Перспективы развития новых опытно-коммерческих методов  
интенсивной пластической деформации**

*G. I. Raab \*, G. N. Aleshin, E. I. Fakhretdinova, A. G. Raab,  
R. N. Asfandiyarov, D. A. Aksenov, I. S. Kodirov*

*Г. И. Рааб \*, Г. Н. Алешин, Э. И. Фахретдинова, А. Г. Рааб,  
Р. Н. Асфандияров, Д. А. Аксенов, И. С. Кодиров*

Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University, Marx str. 12, Ufa,  
450008, Russia

\*giraab@mail.ru

Институт физики перспективных материалов, Уфимский государственный авиационный технический  
университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

\*giraab@mail.ru

#### ABSTRACT

Presents four promising methods of severe plastic deformation (IPD) for the manufacture of long rods (wire rods) and sheet blanks of ultrafine-grained (UMP) metal materials, including the modification of equal-channel angular pressing (ECAP-Conform). In addition, the schemes of shear deformation by the methods of Multi-ECM-Conform, rotational forging and radial active alternating bending are presented. These processes are combined by the extremely non-monotonic nature of the deformation, which leads to the most efficient formation of a homogeneous and gradient structure and a UFG structure in metallic materials. Using computer simulation with the software Deform 3D, the stress-strain state for each method is investigated, its advantages and disadvantages are revealed. The methods used are tested in the manufacture of experimental samples and analysis of structural features. On the basis of the conducted research, the most probable areas of their application for the manufacture of products with an extended set of operational characteristics are determined.

#### KEYWORDS

Severe plastic deformation (SPD) methods; computer simulation; shear deformation; homogeneous and gradient ultrafine-grained structure.

#### АННОТАЦИЯ

Представлены четыре перспективных метода интенсивной пластической деформации (ИПД) для изготовления длинномерных стержней (проволочных стержней) и листовых заготовок ультрамелкозернистых (УМЗ) металлических материалов, включая модификацию равноканально углового прессования (РКУП) в сочетании с Conform (РКУП-Conform). Кроме того, представлены схемы сдвиговой деформации методами Multi-РКУП-Conform, ротационнойковки и радиального активного знакопеременного изгиба. Эти процессы объединены крайне немонотонным характером деформации, что приводит к наиболее эффективному образованию однородной и градиентной структуры, а также УМЗ структуры в металлических материалах. С использованием компьютерного моделирования с программным обеспечением Deform 3D исследуется напряженно-деформированное состояние для каждого метода, выявляются его преимущества и недостатки. Применяемые методы проверены при изготовлении экспериментальных образцов и анализе их структурных особенностей. На основании проведенных исследований определены наиболее вероятные области их применения для изготовления изделий с расширенным набором эксплуатационных характеристик.

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Методы интенсивной пластической деформации (ИПД); компьютерное моделирование; сдвиговая деформация; гомогенная и градиентная ультрамелкозернистая структура.

#### Введение

В настоящее время в металлургической отрасли идет поиск и развитие новых технологий получения высоко-

прочных металлических материалов с удовлетворительной технологической пластичностью. Как известно [1, 2], такие технологии, как интенсивная пластическая деформация

(ИПД) методами равноканально углового прессования (РКУП) по схеме Conform, ротационная ковка, волочение со сдвигом и т. д., продемонстрировали свой высокий потенциал в получении комплекса повышенных физико-механических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Эти технологии используют комбинированные и чрезвычайно немо- нотонные деформации, которые позволяют эффективно формировать градиентные и ультрамелкозернистые (УМЗ) структуры.

В данной статье рассмотрены четыре перспективных для промышленного применения метода интенсивной пластической деформации (ИПД) для изготовления длинномерных (проволочных) стержней и листовых заготовок ультрамелкозернистых (УМЗ) металлических материалов. Все представленные методы характеризуются крайне немонотонным характером деформации, что приводит к наиболее эффективному образованию однородной и градиентной УМЗ структуры в металлических материалах.

### 1. Волочение со сдвигом

В настоящем разделе сравнивается влияние двух разных схем нагружения – обычного волочения (CD) и волочения со сдвигом (SD) [1] – на интенсивность деформации и соответствующее преобразование структуры, которое происходит в низкоуглеродистой стали при этой обработке. Схемы нагружения были выбраны таким образом, чтобы проанализировать структурные и прочностные изменения при реализации двух различных типов деформации: сжатие со сдвигом (во время волочения) и сжатие со сдвигом и вращение

(во время волочения со сдвигом) [1–7]. Также определена взаимосвязь между этими изменениями и механическими характеристиками.

Предварительно для изучения напряженно-деформированного состояния исследуемых материалов было проведено компьютерное моделирование процессов волочения и волочения со сдвигом с использованием программного продукта DEFORM-3D на примере низкоуглеродистой стали 10 в виде калиброванного стержня диаметром 10 мм. Для этого были созданы трехмерные модели в программном продукте «Компас-3D».

Исследование характера полученного моделированием распределения интенсивности деформации показало, что после волочения это распределение является относительно однородным. В то же время, после волочения со сдвигом интенсивность деформации распределяется неравномерно и достигает  $e \approx 1,6$ , что указывает на более интенсивное деформационное воздействие на образец при волочении со сдвигом по сравнению с обычным волочением.

На рис. 1 представлены полученные моделированием схема процесса волочения со сдвигом и графики распределения интенсивности накопленной деформации в поперечном сечении стального прутка.

Графики на рис. 1, б показывают, что за один цикл волочения со сдвигом можно получить существенно более высокую интенсивность деформации по сравнению с обычным волочением и, следовательно, повысить производительность процесса изготовления высокопрочных удлиненных изделий за счет эффективного формирования субмикросталлической структуры.

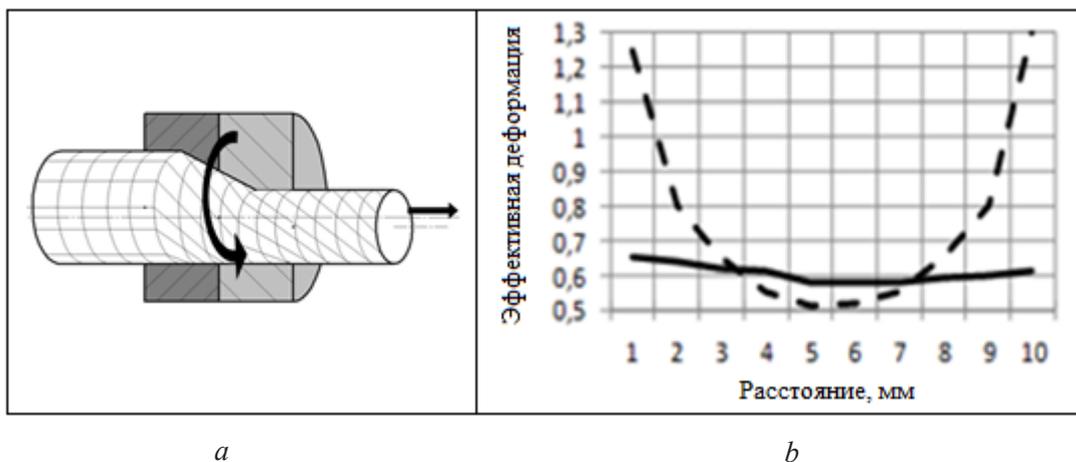


Рис. 1: а – схема волочения со сдвигом; б – распределение интенсивности деформации в поперечном сечении: сплошная линия – CD; штриховая линия – SD

Fig. 1: a – diagram of shear drawing; b – the distribution of strain intensity in the cross section: the solid line – CD; dashed line – SD

Также результаты моделирования (рис. 2) свидетельствуют о том, что при волочении со сдвигом силы волочения уменьшаются почти в 2 раза, неравномерность деформации значительно увеличивается, а нормальные силы, действующие на инструмент, уменьшаются в 1,8 раза.

Исследования микроструктуры ста-

ли в поперечном сечении показали, что в сплаве при волочении со сдвигом формируется градиентная структура, размер зерен в которой меняется от 11 мкм в центральной области прутка до ~0,1 мкм на периферии. Соответственно, значения микротвердости в поперечном сечении прутка изменяются от 2200 до 7000 МПа (рис. 3).

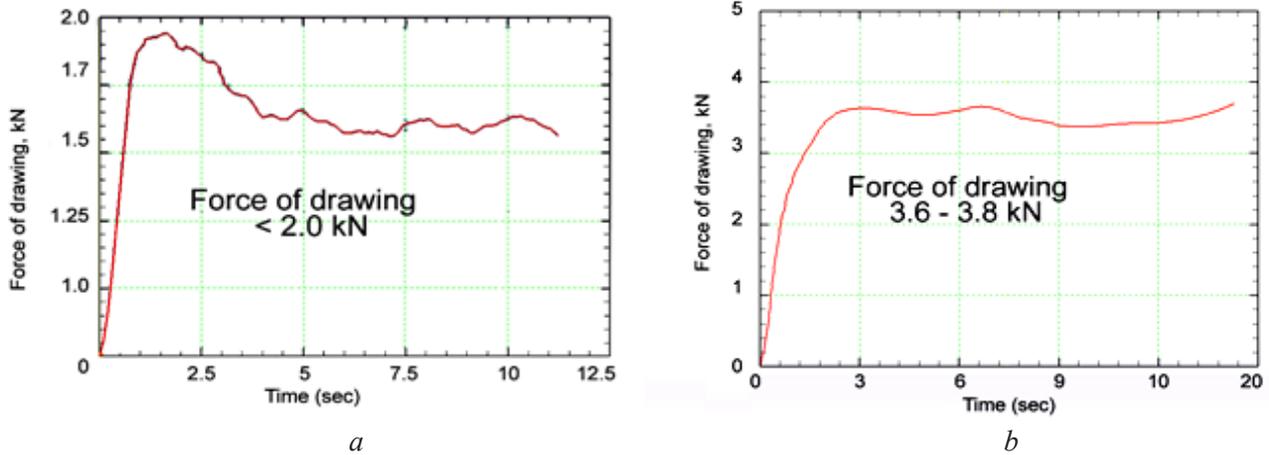


Рис. 2. Сравнительные графики изменения сил волочения при волочении со сдвигом (а) и традиционном волочении (б), полученные моделированием

Fig. 2. Comparative graphs of the change in the drawing force during shear drawing (a) and conventional drawing (b), obtained by modeling



Рис. 3. Изменение микротвердости HV вдоль радиуса прутка стали 10: L, L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> – зоны деформационного влияния эксцентриковой фильеры; 1 – волочение со сдвигом,  $e > 1,5$ ; 2 – обычное волочение,  $e = 0,32$ ; 3 – исходное состояние

Fig. 3. The change in the microhardness HV along the radius of the steel bar 10: L, L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> are zones of the deformation influence of the eccentric die; 1 – shear drawing,  $e > 1.5$ ; 2 – conventional drawing,  $e = 0.32$ ; 3 – the initial state

На рис. 4 в поперечном сечении представлена градиентная микроструктура стали 10 в периферийной области прутка после одного цикла волочения со сдвигом. На снимке микроструктуры условно обозначены зоны деформационного влияния со стороны вращающейся эксцентриковой фильеры – наибольшее воздействие и, соответственно, наибольшее измельчение структуры испытывает область  $L_1$ , значения микротвердости в которой достигают 7000 МПа. В зоне  $L_2$  значения HV изменяются от 3000 до 5000 МПа, а в зоне  $L$  – от 2200 до 3000 МПа (рис. 3).

После одного прохода волочения со сдвигом средний размер зерен в центральной области прутка составляет  $\approx 11$  мкм, но с приближением к боковой поверхности прутка наблюдается уменьшение размеров зерен, которое наиболее заметно проявляется, начиная с условной зоны влияния  $L_2$  в направлении от центра к боковой поверхности прутка, и уменьшается до величины  $\sim 0,1$  мкм в зоне  $L_1$ .

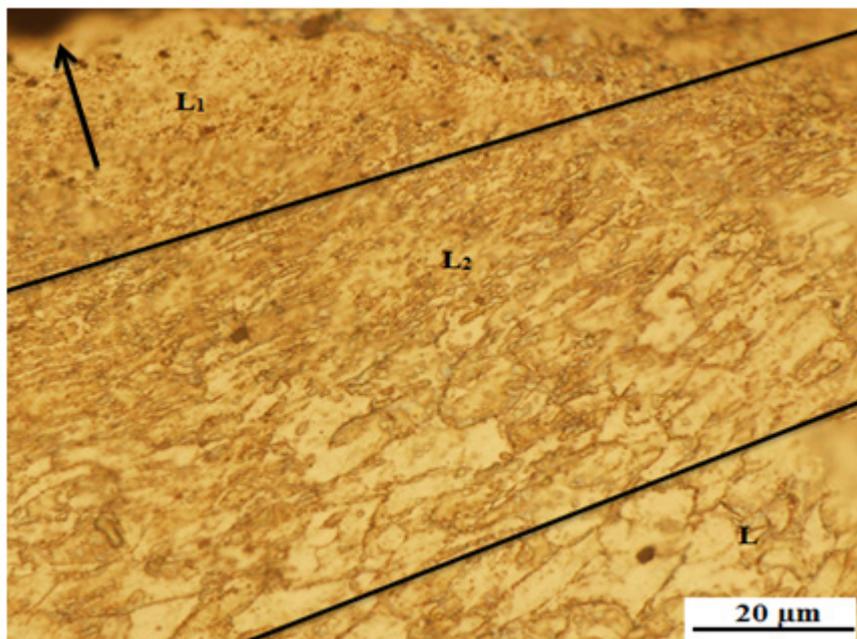
Следует отметить, что при сопоставлении результатов моделирования и физического эксперимента наблюдается определенное соответствие между характером изменения ин-

тенсивности накопленной деформации при моделировании (рис. 1, *b*) и изменением величины микротвердости в поперечном сечении прутков после волочения со сдвигом в физическом эксперименте (рис. 3). Этот факт свидетельствует о применимости используемых методов моделирования для оценки параметров физического эксперимента.

## 2. Multi-РКУП-Conform

Существующие перспективные технологии интенсивной пластической деформации, такие, как РКУП-Conform [8–11] и РКУП с параллельными каналами (РКУП-ПК) [12], обеспечивают формирование УМЗ структуры в заготовках в условиях одноциклового обработки. Однако эти схемы имеют свои недостатки, связанные с продолжительностью одноциклового обработки и, следовательно, с повышенным потреблением энергии и рабочей силы.

Для устранения упомянутых недостатков была разработана новая модификация РКУП-Conform – Multi-РКУП-Conform. Multi-РКУП-Conform обеспечивает трехкратное увеличение уровня накопленной деформации за один цикл обработки.



**Рис. 4.** Поперечное сечение прутка стали 10: градиентная микроструктура в периферийной области образца после волочения со сдвигом.  $L_1$  – сильно деформированная приповерхностная субмикроструктурная область шириной  $\approx 20$ –40 мкм;  $L_2$  – переходная область шириной до 70 мкм;  $L$  – сравнительно слабо деформированная область шириной более 200 мкм. Стрелкой указана боковая поверхность прутка, на которую воздействует эксцентриковая фильера. Световая микроскопия

**Fig. 4.** Steel bar cross-section 10: gradient microstructure in the peripheral region of the specimen after shear drawing.  $L_1$  is a strongly deformed near-surface submicrocrystalline region with a width of  $\approx 20$ –40  $\mu\text{m}$ ;  $L_2$  is the transition region up to 70 microns wide;  $L$  is a relatively weakly deformed region with a width of more than 200 microns. The arrow indicates the lateral surface of the rod, which is affected by the eccentric die.

Light microscopy

Требуется тщательное изучение новых особенностей модификации метода РКУП-Conform, которое будет включать исследование напряженно-деформированного состояния, схем деформации, условий контакта «инструмент–заготовка» и силовых параметров обработки заготовки системы Al-Mg-Si.

Главной особенностью Multi-РКУП-Conform является то, что он объединяет три последовательных сдвига в течение одного цикла обработки [10]. Процесс реализуется следующим образом (рис. 5): стержневая металлическая заготовка 1 подвергается непрерывному угловому прессованию, при этом заготовка подается на вход рабочего канала, образованного между вращающимся роликом 2 с U-образной канавкой и неподвижным ограничивающим основанием (башмаком) 3, окружающим поворотный валок и покрывающим часть длины канавки. Затем заготовка продавливается через рабочий канал по направлению к выпускному отверстию в башмаке 3 благодаря вращению ролика 2 и силам трения, возникающим между канавкой и заготовкой 1.

Анализ предложенной схемы выполнен с помощью компьютерного моделирования с использованием программного продукта DEFORM-3D [8, 13]. Материал исходной заготовки – алюминиевый сплав (Al-6101), его размер – 12×12 мм, сечение конечного стержнеобразного изделия – 10×10 мм.

С учетом того, что схема сдвига увеличивает интенсивность первоначального измельчения структуры [11], были проведены исследования для оценки схемы, сформированной в зонах деформации. Коэффициент Лоде–Надаи использовали в качестве критерия для оценки схемы деформации [14].

На рис. 5 показана схема Multi-РКУП-Conform, распределение контактных напряжений и микроструктура деформированных участков.

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что сжимающие напряжения преобладали в осесимметричной области деформированной заготовки. Схемы сжатия, как правило, обеспечивают изготовление бездефектных полуфабрикатов. В горизонтальном канале образуется область с низкими растягивающими напряжениями до ~ 10 МПа (рис. 2, b), что значительно ниже, чем напряжение течения (~ 150 МПа) сплава при температуре деформации.

Как следует из анализа картины распределения деформации, накопленная деформация в продольном сечении составляет  $e = 4,5–4,7$ .

Как известно, уровень накопленной деформации при РКУП, превышающий  $e = 3$ , приводит, как правило, к образованию УМЗ структуры [15]. Можно предположить, что характер сдвига в зонах деформации и высокий уровень накопленной деформации  $e = 4–5$  за один цикл обработки достаточны для формирования УМЗ структуры.

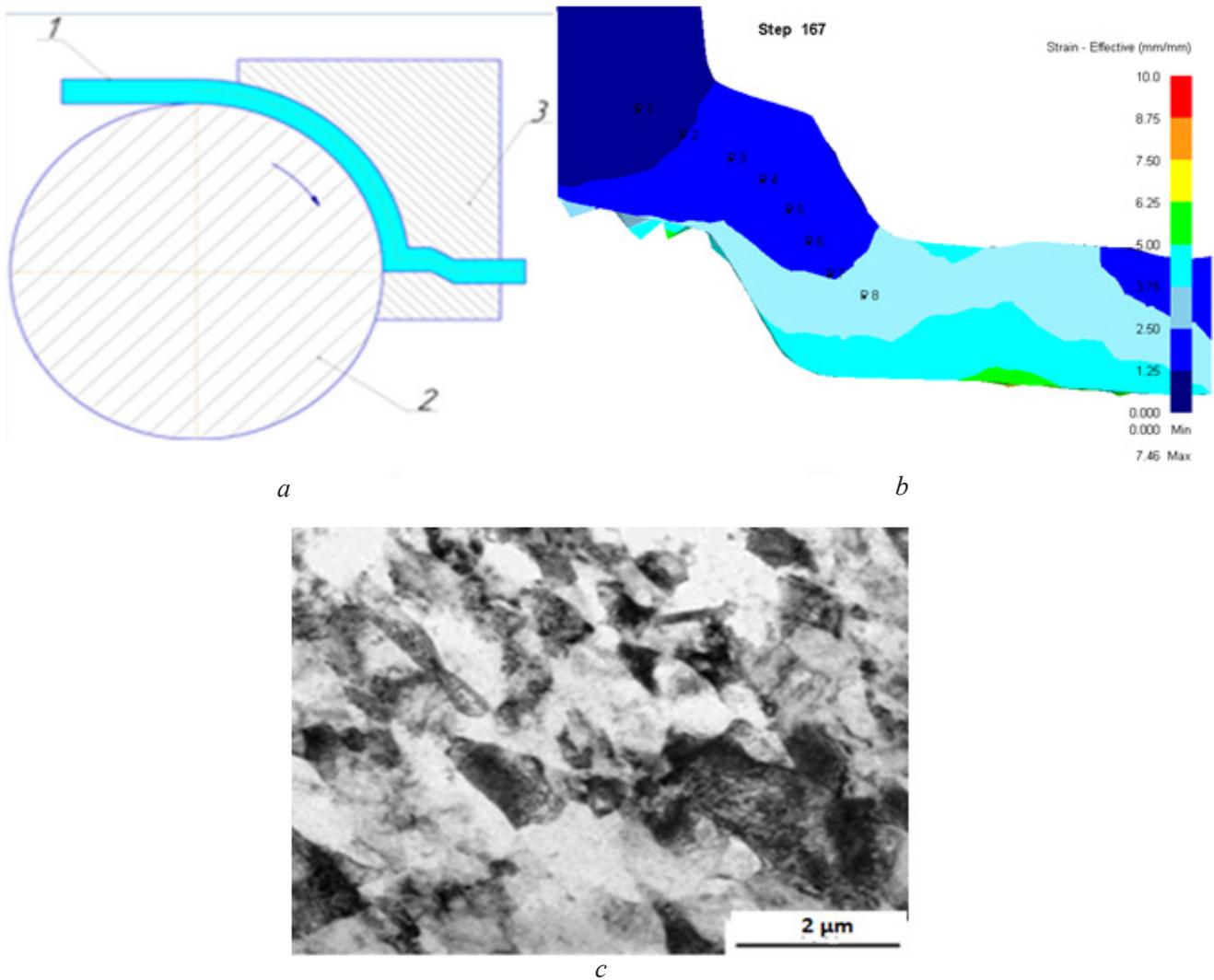
### 3. Ротационная ковка

Еще один интересный для промышленного применения метод – это ротационная ковка (RF). Ротационная ковка является эффективным методом редуциционной обработки металла для производства широкого спектра осесимметричных изделий [2, 13, 16]. Напряженно-деформированное состояние активно влияет на интенсивность упрочнения и структурные изменения в процессе пластической деформации, что в значительной степени зависит от геометрических параметров формирующего инструмента [15–17]. Поэтому важно изучить влияние геометрических параметров наковален на особенности напряженно-деформированного состояния и структурообразования при ротационной ковке металлических материалов.

Для исследования ротационнойковки была выбрана технически чистая медь (российская марка М2) для электротехники. Содержание Cu в этой марке составляет не менее 99,7%, остальное – примеси. Этот сорт материала характеризуется высокой термической и электрической проводимостью и пластичностью. В исходном состоянии средний размер зерна составлял 100 мкм.

В качестве основного инструмента исследования напряженно-деформированного состояния применяли конечно-элементное компьютерное моделирование с использованием программного продукта DEFORM-3D. Для физического эксперимента использовали роторно-ковочную машину В21.29 (производства ОАО «Прессмаш», завод по производству кузнечно-прессового оборудования, базирующийся в г. Таганроге, Россия). Были изготовлены два вида наковален – стандартные и со специальной геометрической формой. Начальный диаметр заготовок составлял 15 мм.

После обработки наковальнями стандартной формы конечный диаметр поперечного сечения заготовки составлял 9 мм ( $F = 63,585 \text{ мм}^2$ ), а после наковален специальной формы поперечное сечение представляло собой квадрат со стороной 8 мм ( $F = 64 \text{ мм}^2$ ). Логарифмическая деформация в физическом эксперименте составляла 1,25.



**Рис. 5:** *a* – схема Multi-ПКУП-Conform: 1 – заготовка, 2 – ролик, 3 – ограничивающая база; *b* – распределение деформационных напряжений в заготовке; *c* – микроструктура алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si после одного прохода Multi-ПКУП-Conform. ПЭМ

**Fig. 5:** *a* – scheme Multi-ECAP-Conform: 1 – blank, 2 – roller, 3 – limiting base; *b* – distribution of deformation stresses in the workpiece; *c* – the microstructure of the aluminum alloy of the Al-Mg-Si system after one pass of the Multi-ECAP-Conform. TEM

Для оценки механических свойств были проведены испытания на растяжение с использованием универсального динамометра Instron 8862. Электропроводность измеряли вихретоковым измерителем удельной электропроводности VE-27NC/4-5. Структурные изменения в результате обработки были изучены с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM6390.

Для оценки напряженного состояния заготовки был рассчитан коэффициент Лодэ–Надаи. Этот коэффициент наиболее информативно характеризует напряженное состояние в процессе пластической деформации и позволяет усовершенствовать технологический процесс для производства более качественных изделий.

Анализ распределения значений коэффициента Лодэ–Надаи показал, что при использовании наковален со стандартными геометрическими параметрами растягивающие напряжения наблюдаются в периферийных областях, что является отрицательным фактором, так как увеличивается вероятность образования дефектов, а при использовании специальной формы наковален преобладают сжимающие напряжения.

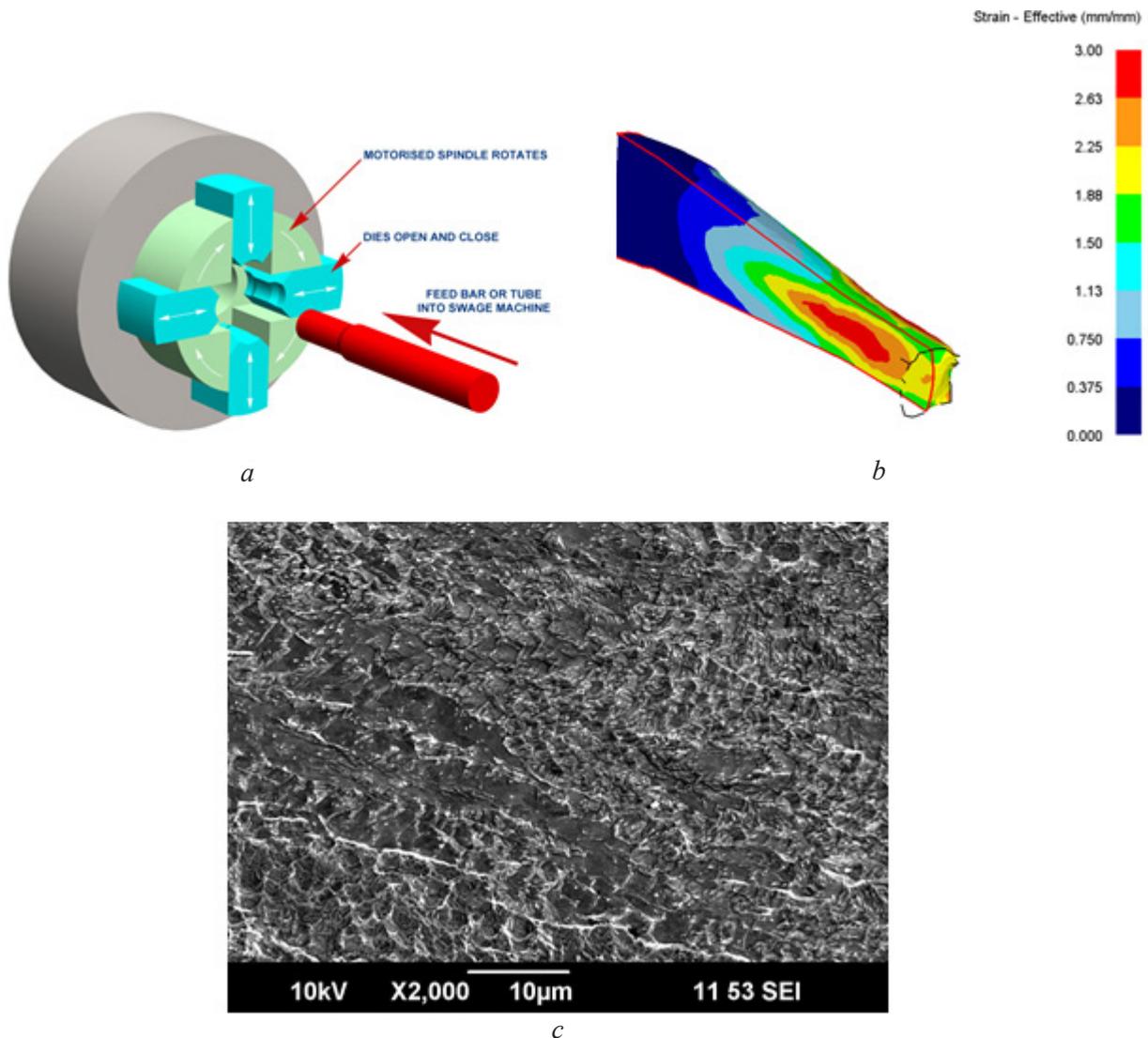
Структура после ротационнойковки со стандартными наковальнями и наковальнями специальной формы была исследована в периферийных и центральных областях образцов методом РЭМ (рис. 6, *c*). Анализ структурных состояний пока-

зывает, что обработка наковальнями специальной формы обеспечивает формирование более тонкой структуры в обеих исследуемых областях (в периферийной области средний поперечный размер зерна после обработки стандартными наковальнями составлял  $13 \pm 1$  мкм, тогда как после обработки наковальнями специальной формы средний поперечный размер зерна составлял  $6 \pm 1$  мкм.) Для обоих типов обработки наблюдается удлинение элементов структуры вдоль продольной оси заготовки.

#### 4. Изгиб стержней

Помимо рассмотренных методов ИПД для получения УМЗ структуры в металличе-

ских полуфабрикатах интересен метод изгиба стержней [18, 19] из меди, железа, титана и других материалов из-за формирования градиентной структуры [2–7, 20], которая состоит из твердых и мелкозернистых поверхностных слоев с пластичной/мягкой центральной областью. Этот метод аналогичен волочению с вращением и попеременным изгибом. На рис. 7, *a* представлена схема протягивания стержня через систему роликов. На рис. 7, *b* показано распределение интенсивности деформации после 12 изгибов, которая достигает 7 в зоне изгиба. Значение микротвердости на периферии стержня после 12 изгибов вдвое больше (микротвердость увеличивается от 600 до 1200 МПа), чем в исходном состоянии.



**Рис. 6:** *a* – принципиальная схема ротационнойковки (21); *b* – распределение интенсивности деформации по сечению заготовки (Deform 3D) ( $e \sim 1,25$ ); *c* – микроструктура центральной части прутка M2 после деформации наковальнями специальной формы. РЭМ

**Fig. 6:** *a* – schematic diagram of rotational forging; *b* – distribution of strain intensity over the section of the workpiece (Deform 3D) ( $e \sim 1.25$ ); *c* – the microstructure of the central part of the M2 rod after deformation by the anvils of a special shape. SEM

Микроструктурные исследования показали, что при изгибе прутков меди М1 формируется градиентная структура с размерами элементов структуры от 500 нм в центральной области до 200–300 нм на поверхности с вытянутыми вдоль оси стержня фрагментами с поперечным размером 100–300 нм, длиной ~ 0,5–1,5 мкм (рис. 7, *с*) и высокой плотностью дислокаций – выше  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Эта структура обладает также и градиентом механических свойств. Так, значения микротвердости в поперечном сечении прутка после 8 проходов гибки изменяются от 800 МПа в центральной области до 1100 МПа на периферии.

Упомянутые выше методы деформационной обработки металлов позволяют существенно улучшить структуру длинномерных изделий и тем самым значительно повысить их механические свойства, вследствие чего эти методы могут иметь перспективы промышленного применения.

### Выводы

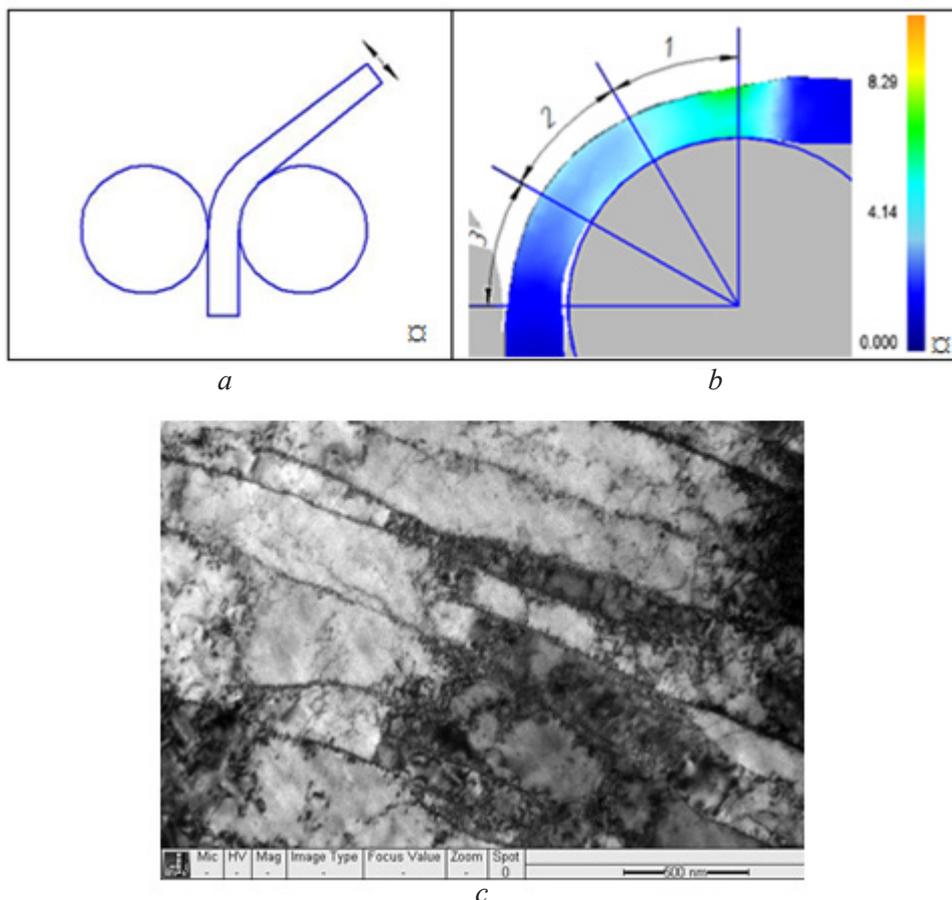
1. Сравнительный анализ схем волочения со сдвигом и обычного волочения показал, что

волочение со сдвигом стали 10 при комнатной температуре снижает энергетические характеристики вдвое, нормальное давление на матрицу – в 1,8 раза, а интенсивность деформации повышается с 0,5 до 1,6.

2. Модифицированный метод РКУП-Conform (Multi-РКУП-Conform) был предложен и исследован путем физического и компьютерного моделирования. Технология позволяет получать заготовки со сверхвысокими деформациями  $\epsilon = 4-5$  за один цикл обработки.

3. Установлено, что метод Multi-РКУП-Conform позволяет сформировать смешанную структуру в алюминиевом сплаве системы Al-Mg-Si, что одновременно повышает прочность и электропроводность материала на 35 и 3% соответственно по сравнению с исходным состоянием.

4. Обработка образцов алюминиевого сплава Al 6101 методом Multi-РКУП-Conform на экспериментальном промышленном оборудовании приводит к увеличению прочности материала со  $180 \pm 4$  до  $268 \pm 10$  МПа по сравнению с исходным состоянием.



**Рис. 7:** *a* – схема протяжки прутка сплава М1 через ролики; *b* – распределение интенсивности деформации после 12 изгибов; *c* – микроструктура в периферийной зоне прутка после деформации. ПЭМ

**Fig. 7:** *a* – driving the M1 alloy rod through the rollers; *b* – strain intensity distribution after 12 bends; *c* – microstructure in the peripheral zone of the rod after deformation. TEM

5. Установлено, что использование наковален специальной формы для ротационнойковки технически чистой меди при холодной обработке ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) обеспечивает формирование более дисперсной структуры вдоль поперечного сечения образца. Таким образом, при одинаковом относительном снижении (70%) максимальные средние значения истинной деформации составляют  $e \sim 0,7$  (при использовании наковален специальной формы) и  $e \sim 0,45$  (при использовании стандартных наковален). При деформации  $e \sim 1,260$  средний размер зерна в случае использования стандартных наковален составляет около  $13 \pm 1$  мкм, а в случае использования наковален специальной формы он равен  $6 \pm 1$  мкм.

6. Деформация стержней из меди марки М1 при изгибе приводит к образованию градиентной структуры с механическими свойствами, меняющимися от центра стержня к его поверхности. Значения микротвердости варьируются от 800 МПа в центральной области до 1100 МПа на периферии. Размер элементов структуры варьируется от 500 нм в центральной области до 200–300 нм на поверхности. В центральной области элементы более равноосны, чем на периферии.

### Благодарности

*Результаты настоящего исследования получены при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-08-00720.*

### Список литературы

1. Рааб Г. И., Рааб А. Г. Устройство для получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом. Патент № 2347633 РФ, МПК В 21 С 1/00. Оpubл. 27.02.2009. Бюлл. № 6.
2. Raab G. I., Simonova L. A., Aleshin G. N. Tailoring the gradient ultrafine-grained structure in low-carbon steel during shear drawing // *Metalurgija*. 2016. V. 55. P. 177–180.
3. Lu K., Lu J. Nanostructure surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment // *Mater. Sci. Eng.: A*. 2004. V. 375–377. P. 38–45.
4. Рааб Г. И., Рааб А. Г. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом // *Изобретатели – машиностроению*. 2011. № 3. С. 4.
5. Investigation of a new shear deformation method for the production of nanostructures in

low-carbon steel / G. Raab et. al. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2014. V. 63. P. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/63/1/012008.

6. Structural variations in low-carbon steel under severe plastic deformation by drawing, free torsion, and shear drawing / G. I. Raab et. al. // *Materials Physics and Mechanics*. 2015. V. 24. P. 242–252.

7. Применение полного факторного эксперимента в процессе волочения со сдвигом / М. В. Чукин и др. // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. Магнитогорск*. 2012. № 4. С. 33–37.

8. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform / G. J. Raab et. al. // *Mater. Sci. Eng.: A*. 2004. V. 382, No. 1–2. P. 30–34. DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.021.

9. Principles of ECAP-Conform as a continuous process for achieving grain refinement: application to an aluminum alloy / C. Xu et. al. // *Acta Mater.* 2010. V. 58, No. 4. P. 1379–1386. DOI: 10.1016/j.actamat.2009.10.044.

10. Способ непрерывного равноканально-углового прессования металлических заготовок в виде прутка / Г. И. Рааб и др. // Патент № 2560474 РФ, МПК В 21 С 23/00. Оpubл. 20.08.2015.

11. Воронцова Л. А., Маслов В. В., Пешков И. Б. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях. М.: Энергия, 1971. 224 с.

12. Raab G. I. Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels // *Mat. Sci. Eng.: A*. 2005. V. 410–411. P. 230–233. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.089

13. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.

14. Осинцев О. Е., Фёдоров В. Н. Медь и медные сплавы. Российская и иностранная маркировки: справочник. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.

15. Процессы пластического структурообразования / В. М. Сегал и др. // Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.

16. Hansen N. Cold deformation microstructures // *Mat. Sci. Techn.* 1990. V. 6, No. 11. P. 1039–1047. DOI: 10.1179/mst.1990.6.11.1039.

17. Утяшев Ф. З., Рааб Г. И. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Уфа: Гилем, НИК Башк. энцикл., 2013. 376 с.

18. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением

с кручением / М. В. Чукин и др. // Патент РФ № 2467816, МПК В21С 1/00, В21J 5/06, С21D 7/00. Оpubл. 27.11.2012. Бюл. № 9.

19. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой / М. А. Полякова и др. // Патент РФ № 130525 МПК В21С1/00. Оpubл. 27.07.2013.

20. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах / В. В. Коваленко и др. Новокузнецк: Изд-во ООО «Полиграфист», 2009. 557 с.

21. Blog Mitesh Bairwa. URL: <https://www.mech4study.com>