

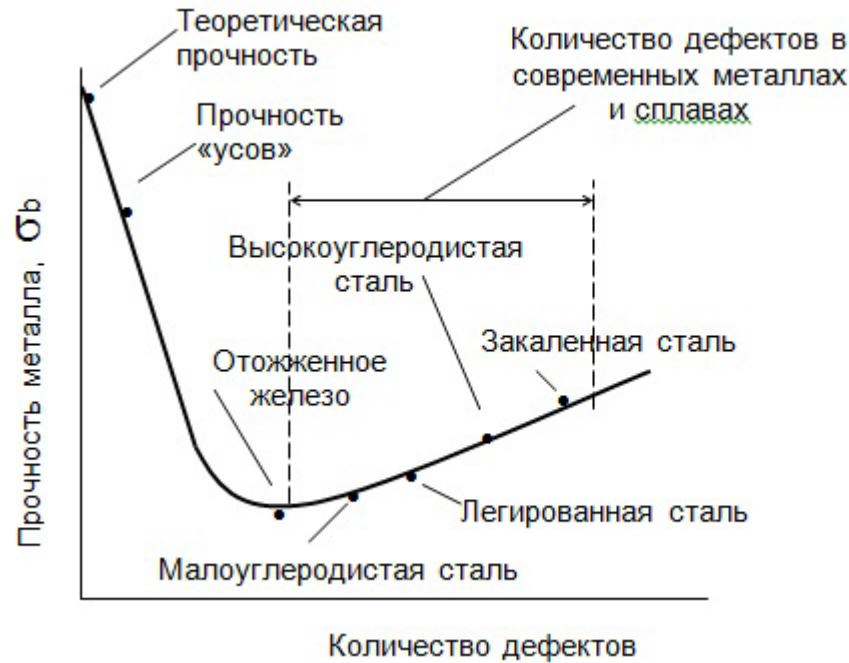
МЕТАЛЛЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ: ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЦЕССЫ

МОДУЛЬ 2. Процессы и методы формирования наноструктурных состояний в конструкционных материалах

Лекция 6

Дефекты кристаллической решетки. Методы интенсивной пластической деформации. Равноканальное угловое прессование. Кручение под высоким давлением. Всесторонняя ковка.

Влияние дислокаций и других искажений кристаллической решетки на прочность сплава (стали)



Все дефекты можно разделить на:

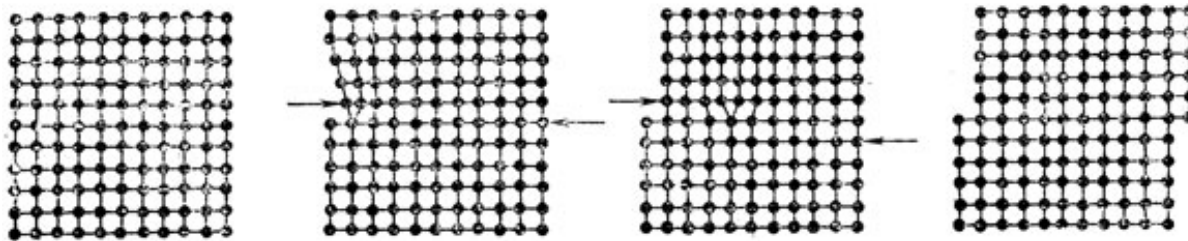
- **нульмерные** (точечные) дефекты, к которым относятся вакансии, межузельные атомы, сочетания этих дефектов, и т.п.;
- **одномерные** (линейные) дефекты: дислокации, цепочки вакансий, межузельных атомов и т. д.);
- **двумерные** (поверхностные) дефекты: границы зерен и двойников, межфазные границы, страты роста, границы зон роста;
- **трехмерные** (объемные) дефекты: пустоты, включения второй фазы и т.д

Пластическая **деформация** в кристалле **осуществляется** путем **сдвига** одной его части относительно другой.

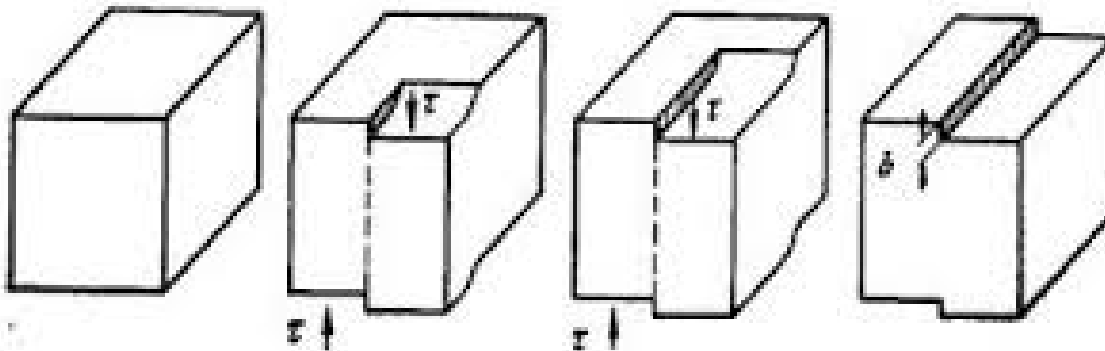
Имеется две разновидности сдвига: скольжение и двойникование.

Элементарный акт сдвига – это смещение одной части кристалла относительно другой на одно межатомное расстояние, которое осуществляется путем последовательного перемещения дислокаций.

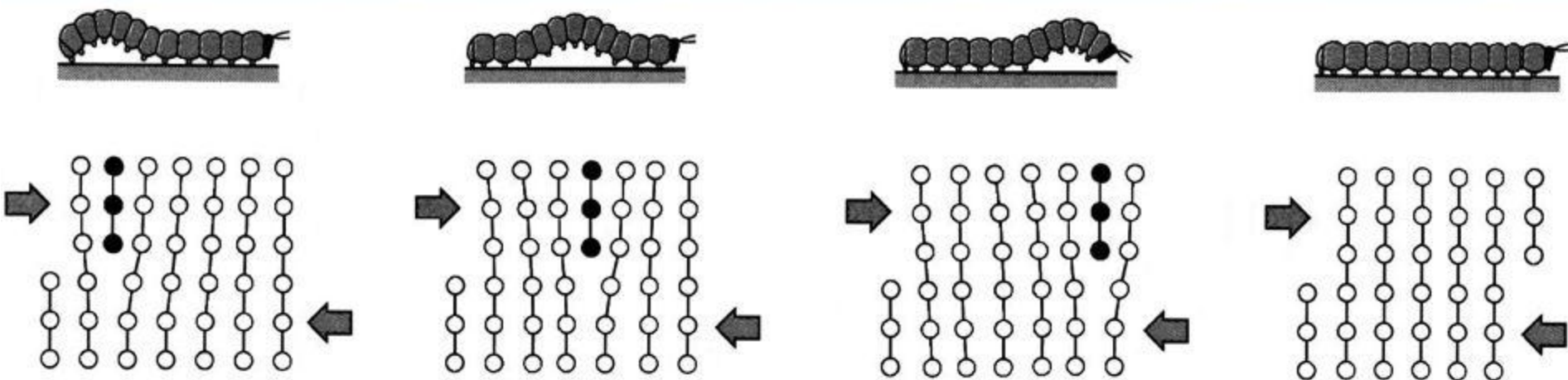
Пластическая деформация кристалла с краевой дислокацией



Пластическая деформация кристалла с винтовой дислокацией



Скольжение дислокации подобно перемещению гусеницы



Лапки гусеницы, оторванные от земли, – это дефект.

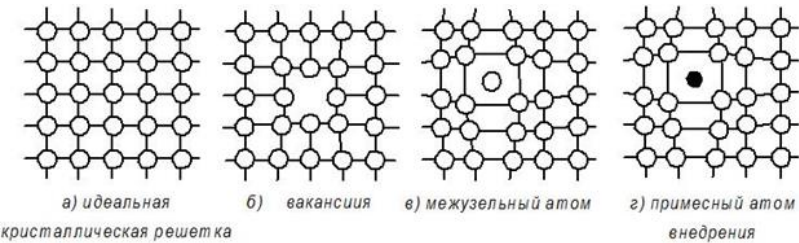
Дислокация (недостроенная атомная плоскость) – это дефект.

Двигается **дефект**, а в итоге смещается **вся** гусеница или **вся** верхняя часть кристалла.

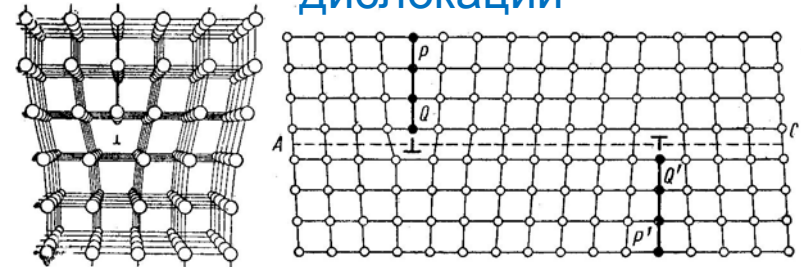
Необходимое условие для движения дислокаций – трансляционная симметрия кристалла!

Подавление дислокационного скольжения может быть достигнуто за счет:

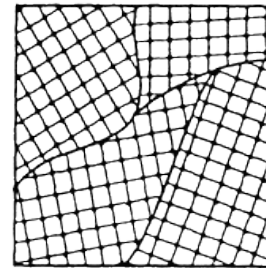
точечные дефекты



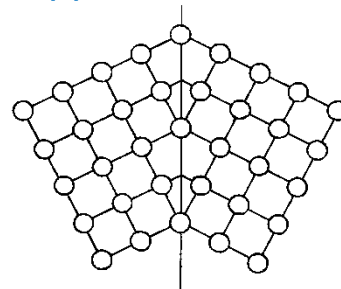
дислокации



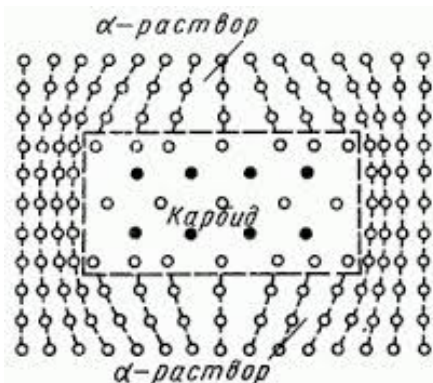
границы зерен



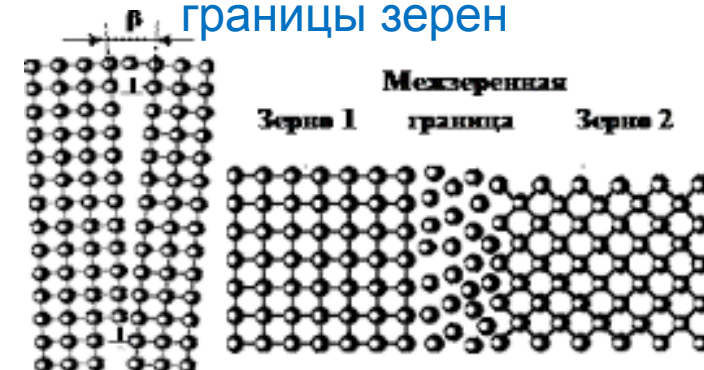
границы двойников



дисперсные включения



малоугловые и большеугловые границы зерен



Интенсивная пластическая деформация ([англ.](#) *severe plastic deformation*) — способ получения беспористых металлов и сплавов с размером зерна около 100 нм, заключающийся в формировании за счет больших деформаций сильно фрагментированной и разориентированной структуры.

равноканальное угловое прессование

экструзия через фильеру

кручение под одноосным сжатием

Всесторонняя ковка

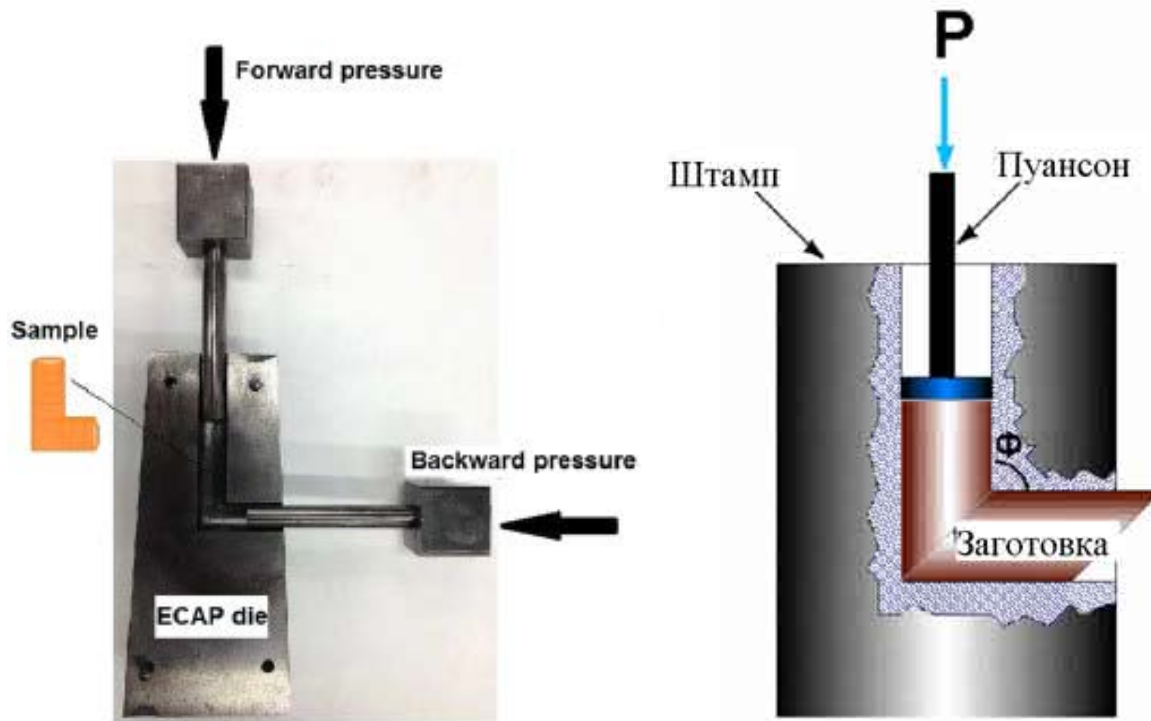
многократная прокатка

многократное гофрирование-распрямление

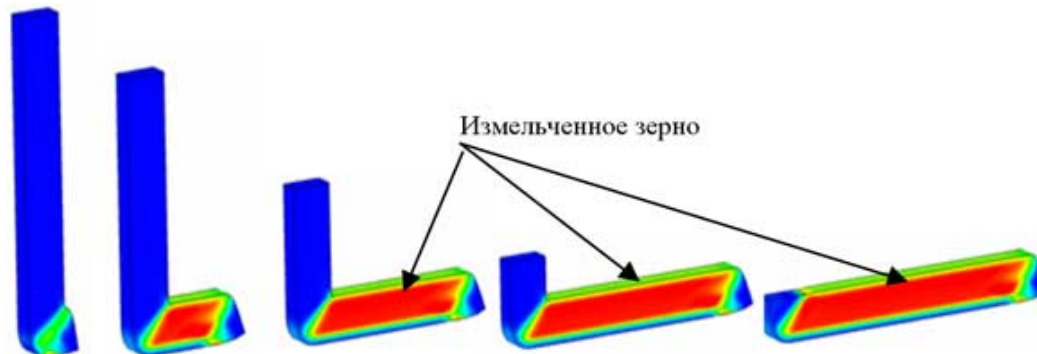
Table 1: Major SPD processes.

Process name	Schematic representation	Equivalent plastic strain
Equal channel angular extrusion (ECAE), Segal, 1977		$\epsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \varphi$
Cyclic extrusion-compression (CEC), J. and M Richert, Zasadzinski, Korbil, 1979		$\epsilon = n 4 \ln \left(\frac{D}{d} \right)$
High-pressure torsion (HPT), Valiev et al., 1989		$\epsilon = \frac{t g \gamma}{\sqrt{3}}$
Cyclic closed-die forging (CCDF), Ghosh, 1988		$\epsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{H}{W} \right)$
Accumulative roll-bonding (ARB), Saito, Tsuji, Utsunomiya, Sakai, 1998		$\epsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{T}{t} \right)$
Repetitive corrugation and straightening (RCS), Zhu, Lowe, Jiang, Huang, 2001		$\epsilon = n \frac{4}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{r+t}{r+0.5t} \right)$

РАВНОКАНАЛЬНОЕ УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ



Заготовка продавливается под нагрузкой P с использованием пуансона в специальной оснастке через 2 канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися обычно под углом $\phi=90^\circ$.



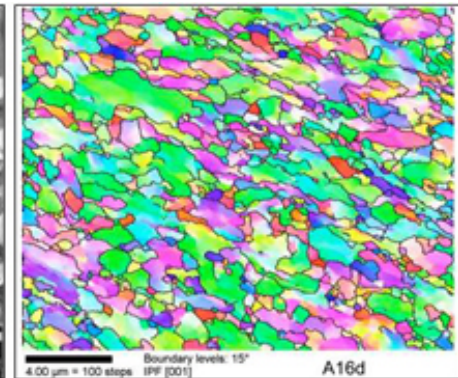
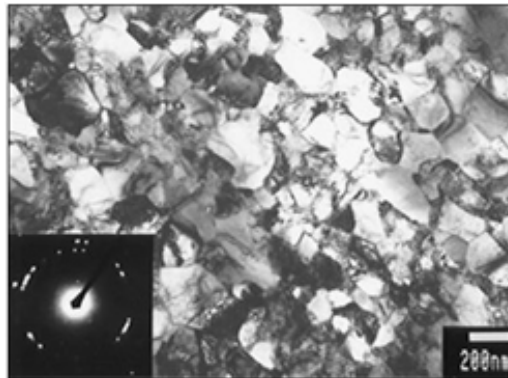
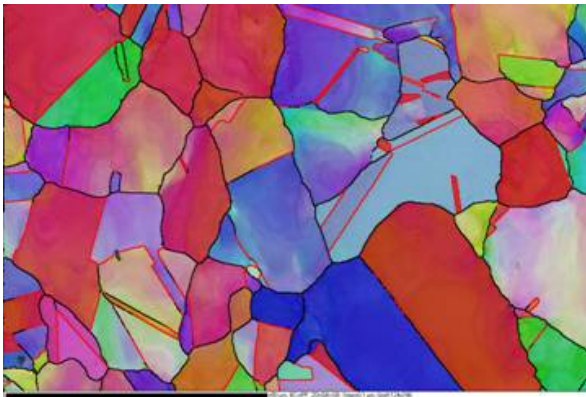
При необходимости в случае труднодеформируемых материалов деформация осуществляется при повышенных температурах.

РКУ-прессование является наиболее эффективным способом получения нанокристаллической структуры.

Неизменные поперечные сечения образцов дают возможность для повторного деформирования заготовки.

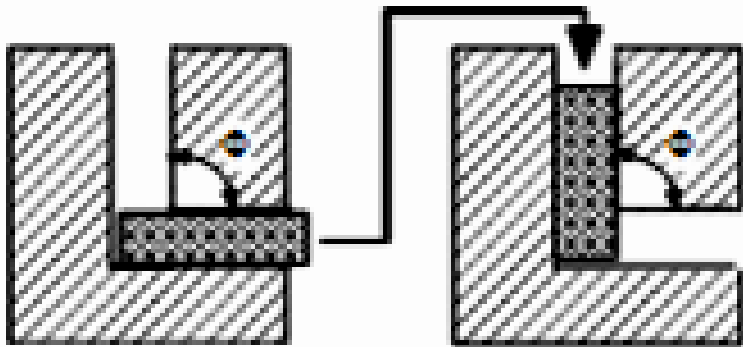
Благодаря многократному прессованию в такой оснастке в ультрамелкозернистых материалах, полученных равноканальным угловым прессованием, могут быть достигнуты истинные степени деформации равные 10 и более без разрушения образцов.

За 7...10 проходов чистые металлы приобретают нанокристаллическую структуру с размером зерен 200–300 нм, а сплавы — с размером менее 100 нм.



Структура меди до и после РКУ прессования при $T = 20^{\circ}\text{C}$ и $N = 12$ (ПЭМ и EBSD-анализ)

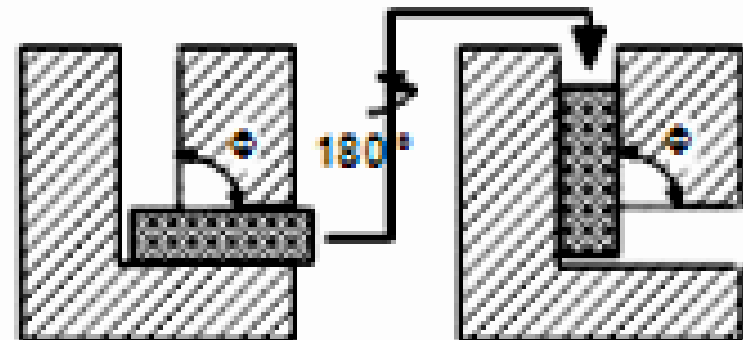
В процессе РКУ-прессования для структурообразования важными являются направление и число проходов заготовки через каналы



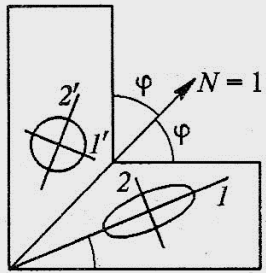
маршрут А: ориентация заготовки остается неизменной при каждом проходе



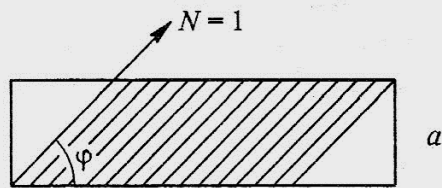
маршрут В: после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей оси на угол 90°



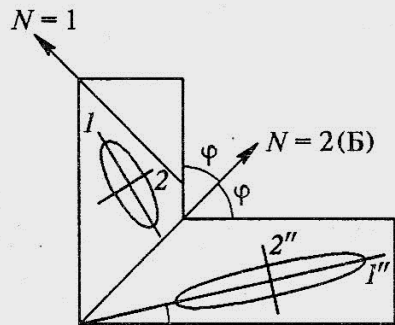
маршрут С: после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей оси на угол 180°



$$\psi = 22^\circ 30'$$

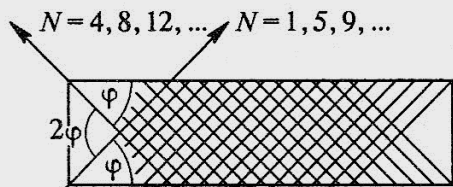


a



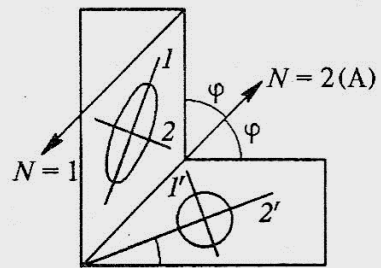
$$\chi_N$$

Маршрут А

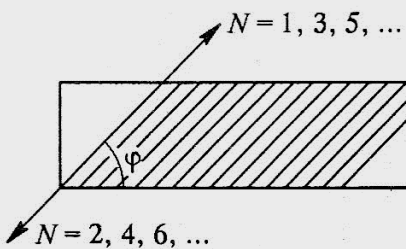


б

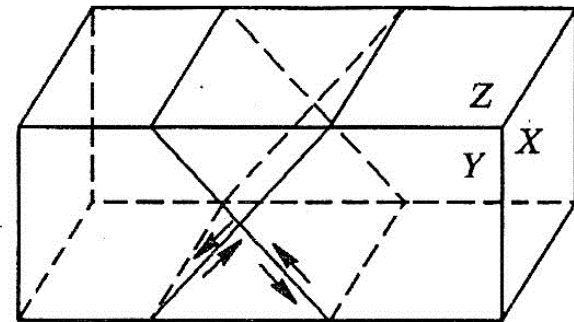
Маршрут С



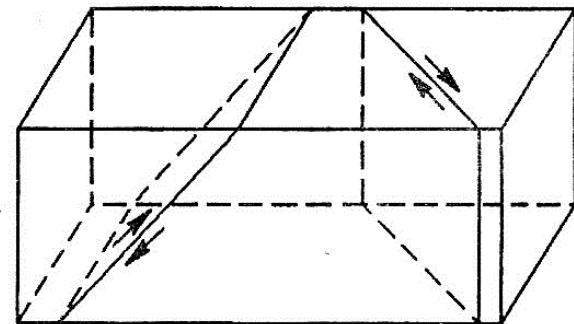
$$\psi = 22^\circ 30'$$



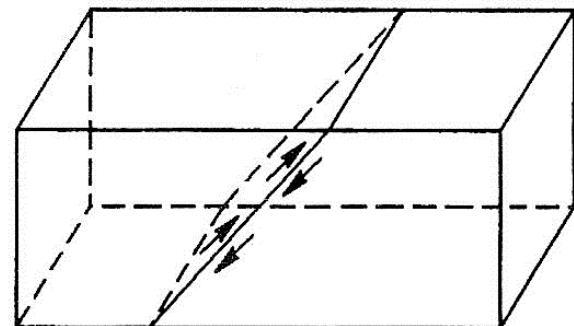
в



Маршрут А



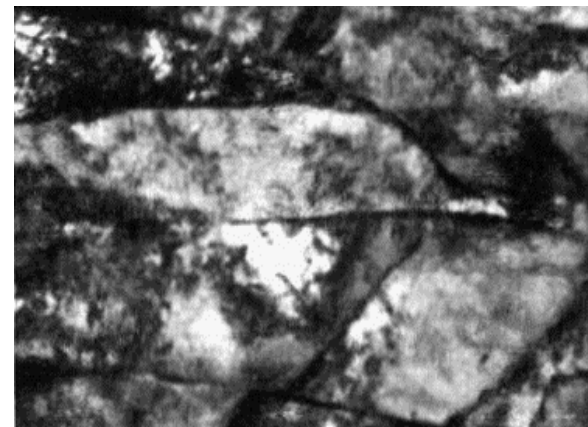
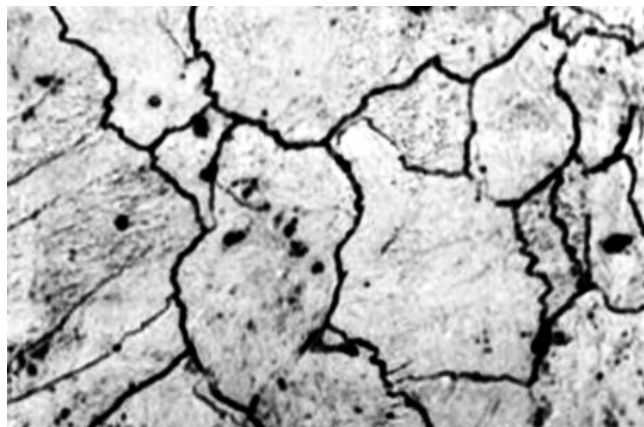
Маршрут В



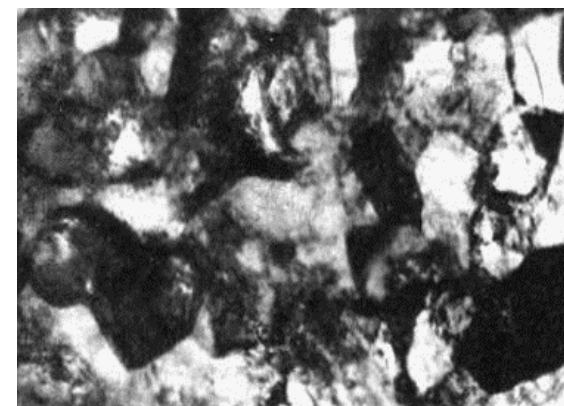
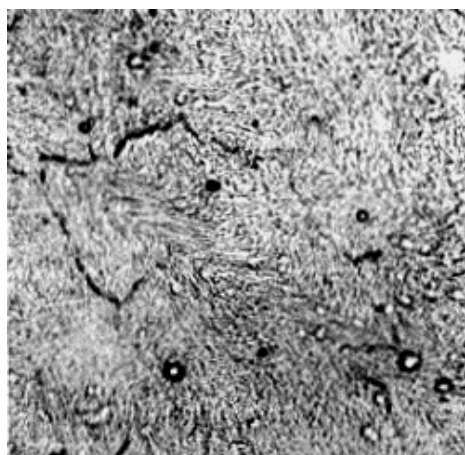
Маршрут С

Влияние числа проходов на структуру

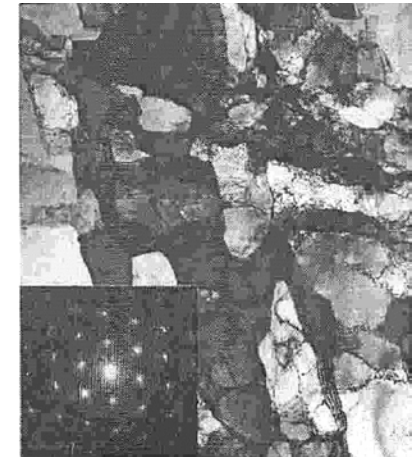
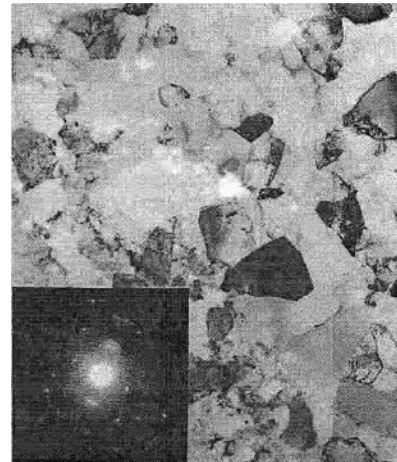
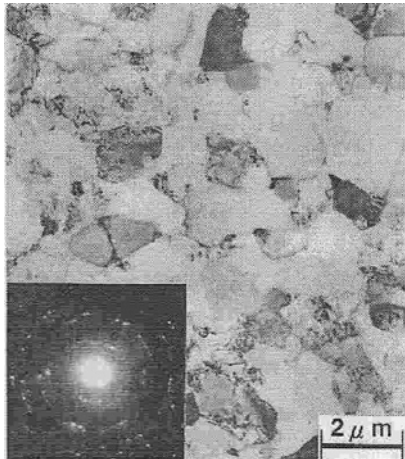
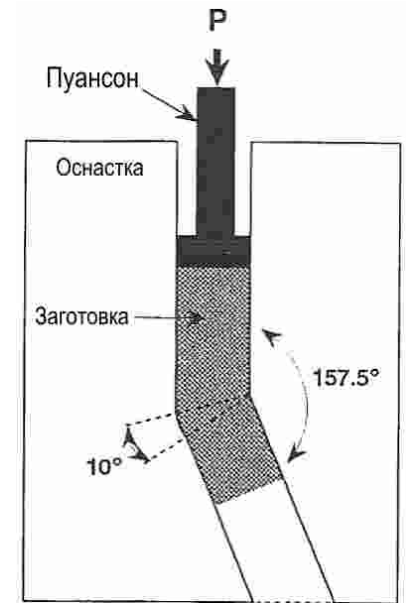
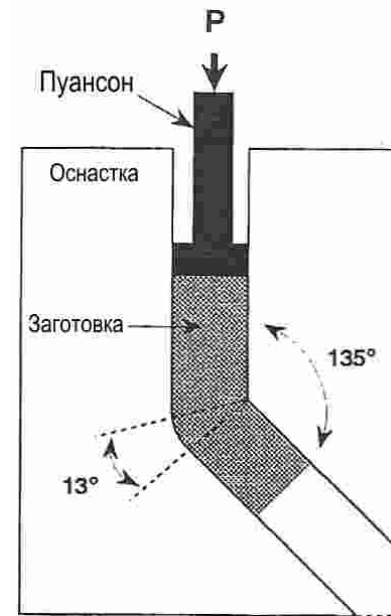
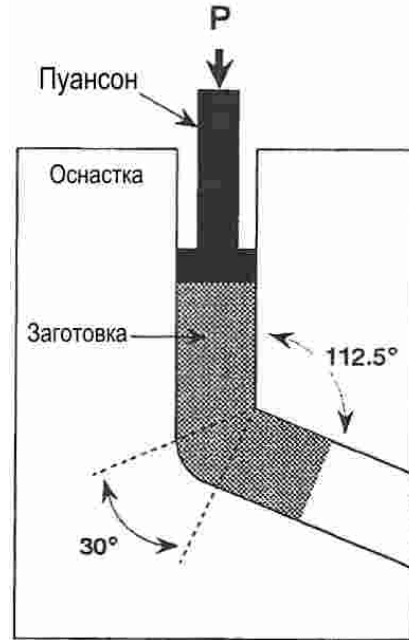
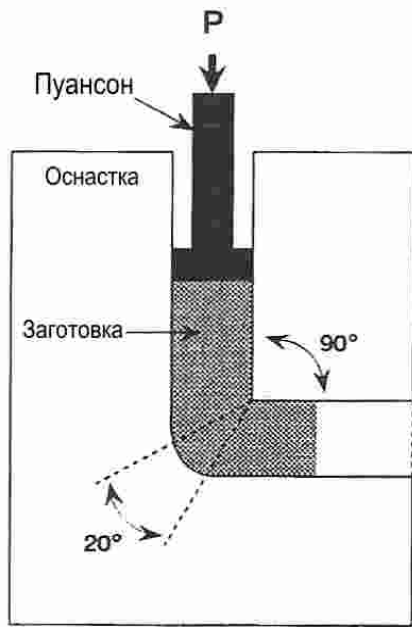
2 прохода



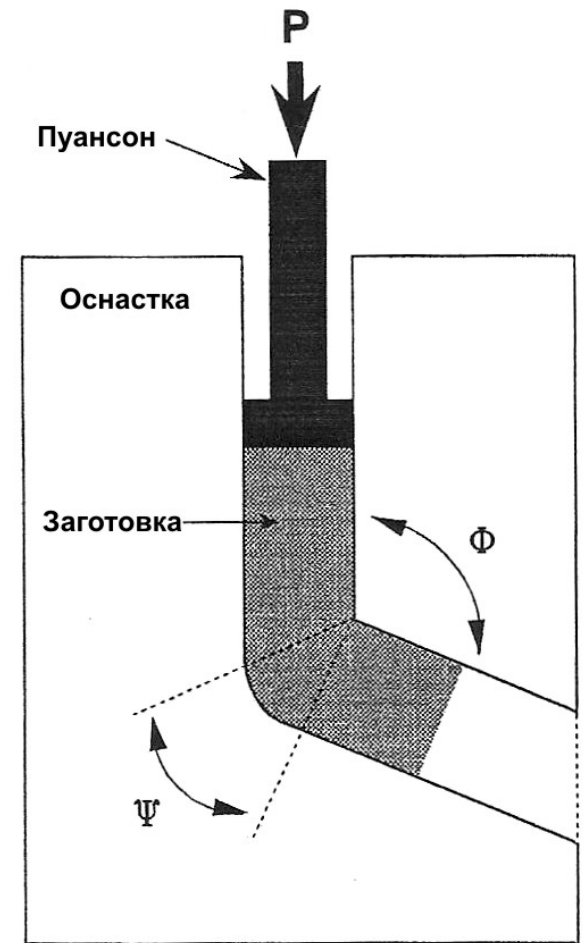
12 проходов



Микроструктура и дифракционные картины, полученные при степени деформации 4 по маршруту В при различных углах φ и ψ



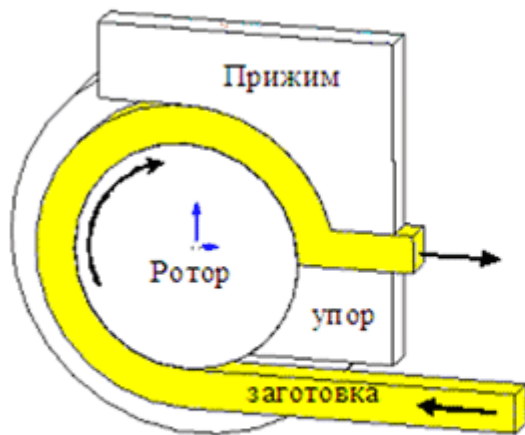
Рассчитать степень деформации образца при равноканальном угловом прессовании за N проходов можно с использованием следующего соотношения:



$$\varepsilon_N = N \left[\frac{2ctg(\phi/2 + \psi/2) + \psi \operatorname{cosec}(\phi/2 + \psi/2)}{\sqrt{3}} \right]$$

Недостатки РКУ-прессования

- относительно малая производительность,
- возможность получения только относительно коротких цилиндрических образцов (с отношением высоты к диаметру 4:1),
- необходимость удаления неоднородно прорабатываемой при деформации краевой части заготовок, что снижает коэффициент использования металла



а)



б)

РКУ-прессование по схеме Conform позволяет обрабатывать длинномерные прутки различных металлов диаметром от 8 мм до 12 мм и длиной до 3 м. В результате первого цикла РКУП-С пруток получает сдвиговую деформацию е около 0.7 мм. Затем циклы деформации повторяются несколько раз. После РКУП-Conform прутки подвергаются волочению, которое позволяет получить пруток круглого сечения (наиболее востребованного промышленностью), дополнительно измельчить структуру и повысить прочность.

Многократная экструзия через фильеру или циклическая экструзия

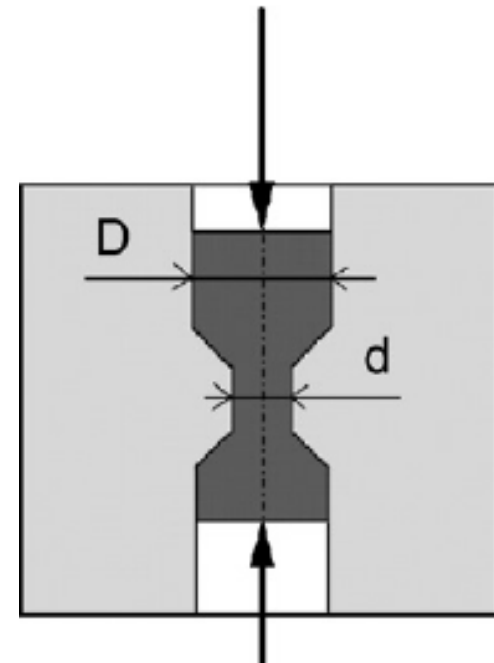
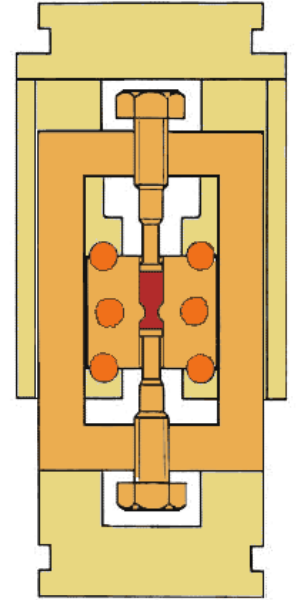
Метод заключается в многократном деформировании металла экструзией (СЕС-cyclic extrusion-compression), или прессованием, через суженое отверстие оснастки, продольное сечение которой имеет форму песочных часов.

В образце накапливаются огромные деформации, реализуемые путем чистого сдвига, при этом размеры заготовки не изменяются.

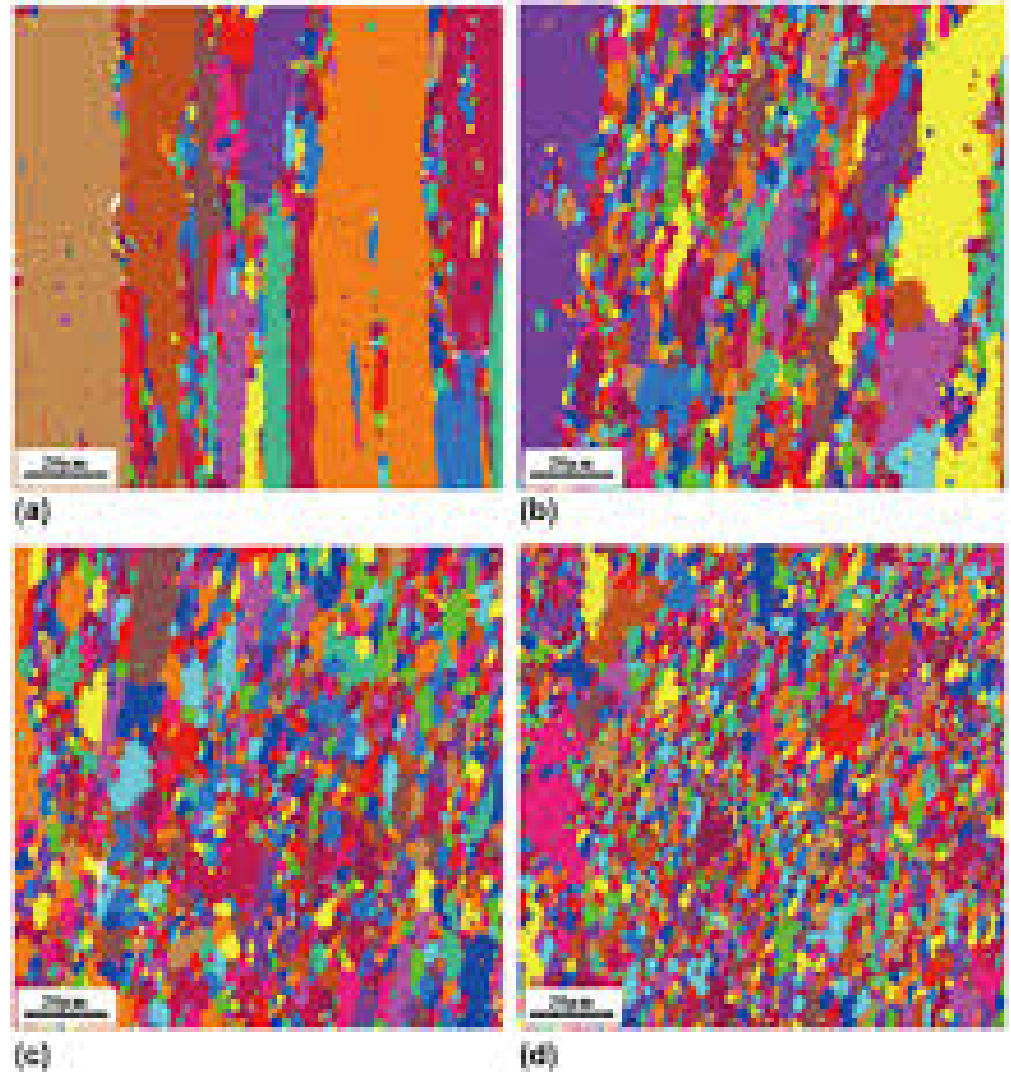
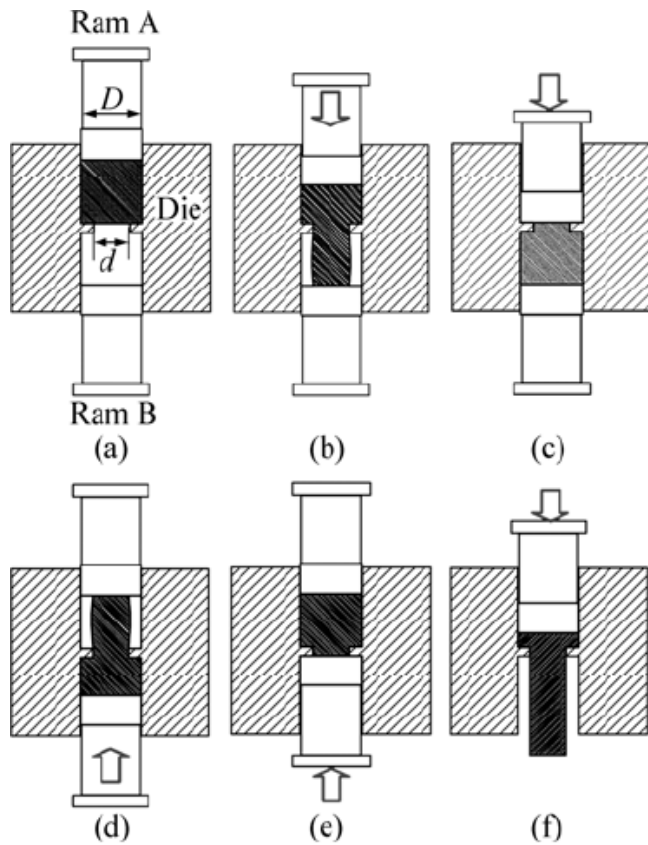
Истинная степень накопленной деформации определяется формулой:

$$\varphi = 4N \ln(D/d)$$

где D и d — диаметры цилиндрической и сужающейся рабочей части матрицы соответственно,
 N — число циклов деформации, приложенных к образцу.

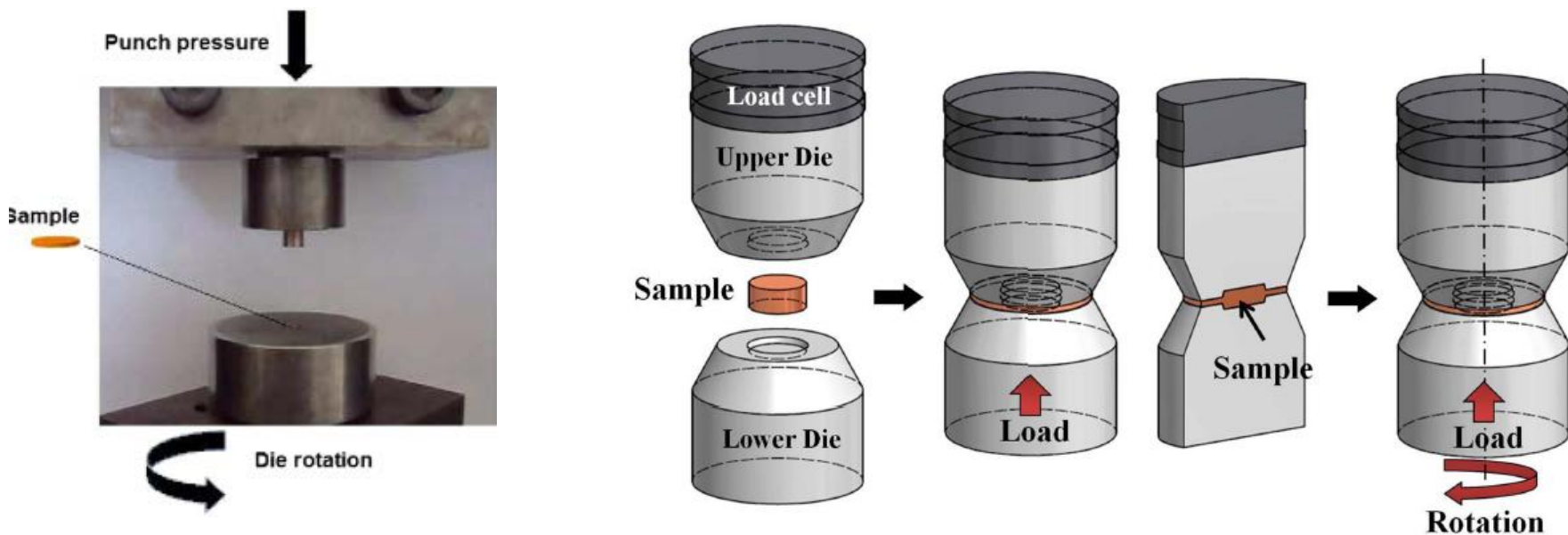


Многократная экструзия через фильеру или циклическая экструзия



EBSD-карты Al-Li сплава до (а) и после циклической экструзии при 300 °С: 1 проход (б), 3 прохода (в) и 7 проходов (г)

Кручение под одноосным сжатием или деформация кручением под высоким давлением



Образец помещается между бойками и сжимается под приложенным давлением P в несколько ГПа. Нижний боек вращается, и силы поверхностного трения заставляют образец деформироваться сдвигом.

Геометрическая форма образцов такова, что основной объем материала деформируется в условиях квазигидростатического сжатия под действием приложенного давления и давления со стороны внешних слоев образца. В результате деформируемый образец, несмотря на большие степени деформации, не разрушается.

Для расчета истинной логарифмической степени деформации ε используют формулу

$$\varepsilon = \ln(\theta r/l),$$

где θ — угол вращения в радианах, r и l — радиус и толщина диска соответственно.

Согласно этому соотношению, при кручении под давлением логарифмическая степень деформации по периметру типичных образцов диаметром 20 мм и толщиной 1 мм составляет 6, а по периметру образцов диаметром 10 мм и толщиной 0,2 мм — 7. В то же время в центре этих образцов она равна нулю.

На самом деле измельчение микроструктуры в центре образца имеет место, хотя

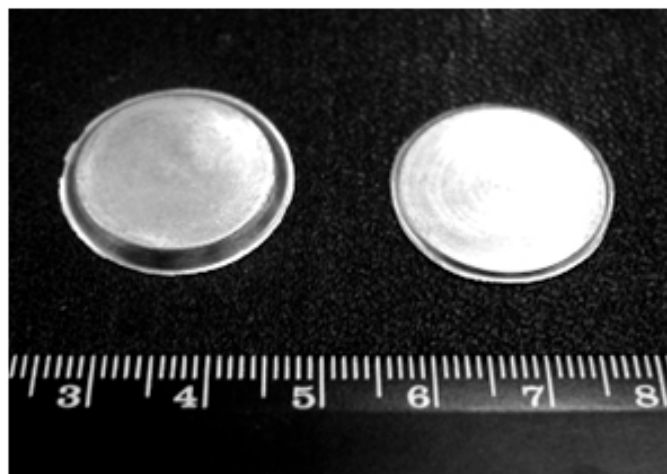
в ходе подобной обработки не удается добиться **однородной** структуры по диаметру образцов. В связи с этим при исследовании процессов эволюции микроструктуры в ходе ИПД кручением более правильно рассматривать **число оборотов**, а не величину деформации, рассчитанную с помощью аналитических выражений.

AZ31
HPT: 6 GPa (463 K) N = 1/4
r ~ 2.0 mm (bottom)



Figure 2. Grain structure in the region near the bottom of a sample processed by HPT for 1/4 turn at 463 K¹².

Полученные ИПД кручением образцы имеют форму обычных дисков размером от 10 до 20 мм и толщиной 0,2–0,5 мм. Существенное измельчение структуры наблюдается уже после деформирования на пол-оборота, но для создания однородной наноструктуры требуется, как правило, деформация в несколько оборотов.



ИПД кручением может быть успешно использована не только для измельчения структуры, но и как метод консолидации порошков. Высокие давления, равные нескольким ГПа, при деформации кручением при комнатной температуре могут обеспечивать достаточно высокую плотность, близкую к 100%, в получаемых НК образцах в форме дисков.

Всесторонняя ковка

Для деформационной обработки объемных заготовок используется *схема всесторонней изотермической ковки*, которая позволяет подавить локализацию деформации в объемах материала с уже рекристаллизованной микроструктурой.

Эта схема представляет собой совокупность операций **осадки**, **кантовки** и **протяжки**, в результате выполнения которых, в конце этапа, заготовка приобретает форму и размеры, приблизительно совпадающие с исходными. То есть, схема обеспечивает цикличность деформационной обработки.



Методология поэтапного уменьшения размера зерен вплоть до наноструктурного уровня основана на поэтапном снижении температуры деформационной обработки заготовки.

При этом она базируется на значительном повышении технологической пластичности металлов и сплавов, происходящем в результате измельчения микроструктуры, достигаемом на каждом предыдущем этапе.

Если проводить каждую последующую деформацию, не меняя температурно-скоростных условий, то материал переходит в состояние сверхпластического течения, что повышает однородность микроструктуры, но препятствует дальнейшему ее измельчению.

Снижение температуры деформации (с сохранением прежней скорости деформации) позволяет дальше измельчить микроструктуру.

Повторное использование всесторонней изотермическойковки при пониженной температуре вновь позволяет получить полностью рекристаллизованную, однородную микроструктуру с высокой долей большеугловых границ зерен, но уже с существенно более мелким размером рекристаллизованных зерен.



Объемные титановые наноструктурные полуфабрикаты, полученные методом всестороннейковки



Основных преимущества метода всестороннейковки:

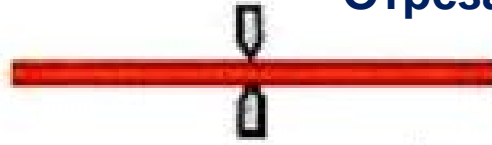
- благодаря всесторонней изотермической ковке, приводящей к формированию однородной микроструктуры с размером зерен вплоть до наноразмерного, окончательная обработка может проводиться при относительно низкой температуре с использованием относительно дешевого деформирующего инструмента;
- изотермическая обработка устраняет дефекты присущие слитку и повышает однородность микроструктуры, способствуя повышению эксплуатационных свойств изделия/полуфабриката;
- удастся уйти от многопереходности технологического процесса;
- существенно возрастает коэффициент использования материала.

Многократная прокатка

Обработка поверхности



Отрезание



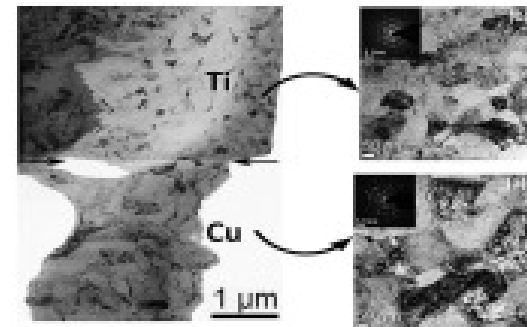
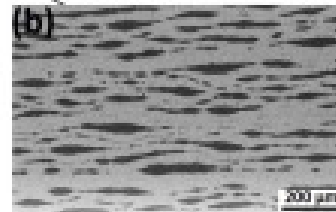
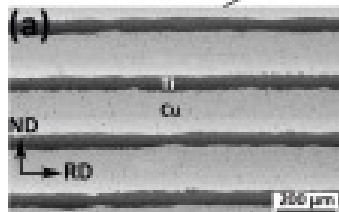
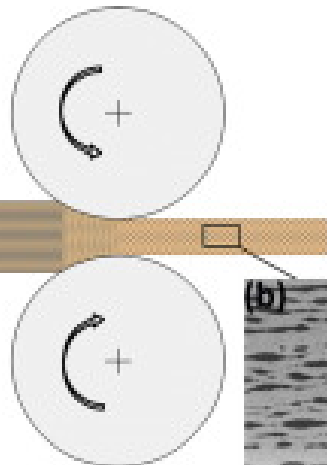
Штабелирование

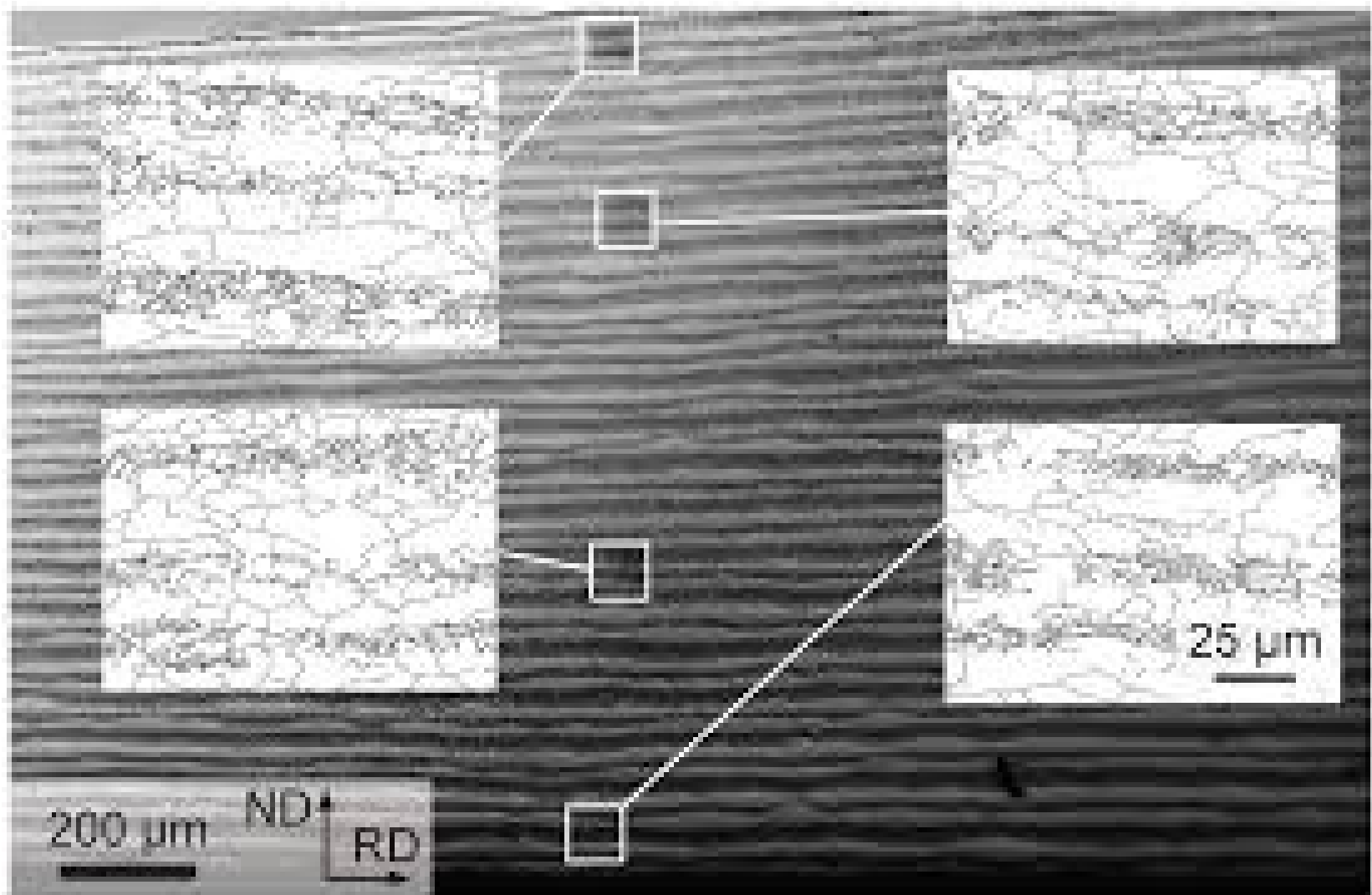


Нагрев



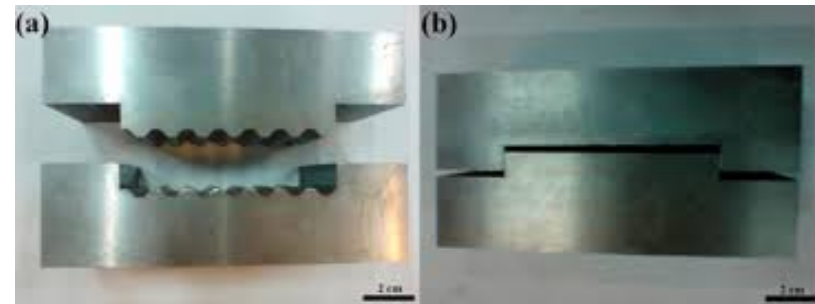
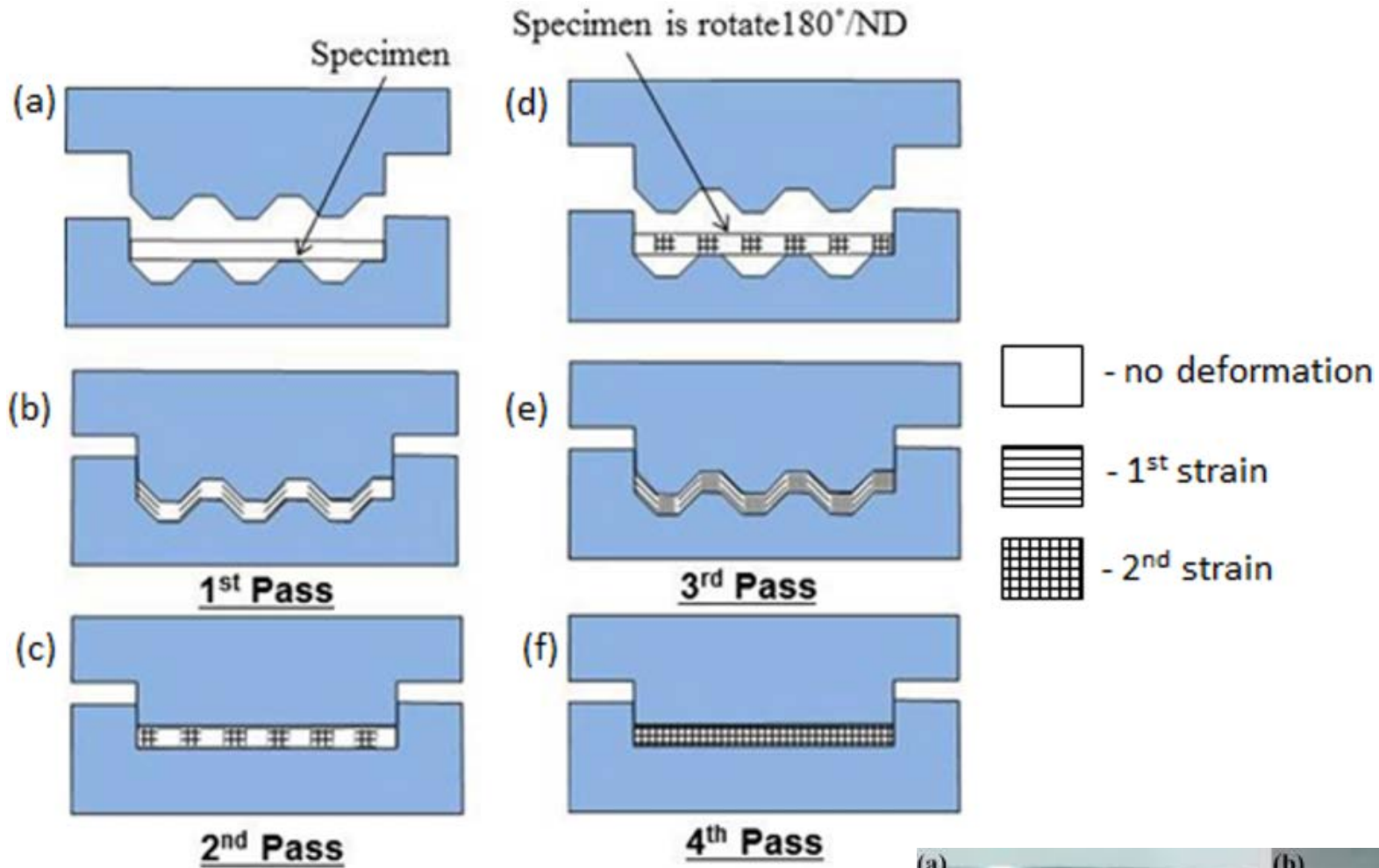
Прокатка



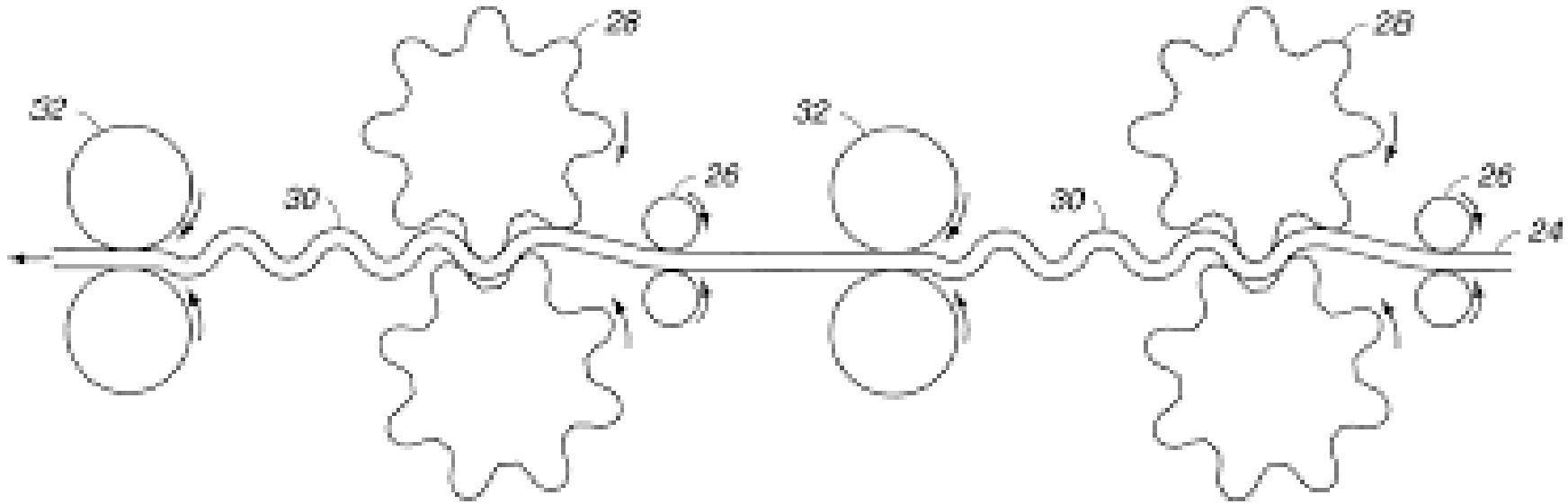


Микроструктура многослойного Ti/Al композита

Многократное гофрирование-распрямление



Многократное гофрирование-распрямление



A method for producing an ultrafine-grained product, comprising the steps of:

- (a) bending a metal or alloy workpiece having opposing, substantially flat surfaces into a corrugated shape;
- (b) applying forces to the corrugated workpiece sufficient to substantially restore the flat surfaces and produce a finer-grained workpiece; and
- (c) repeating steps (a) and (b) until the workpiece is transformed into an ultrafine-grained product having a refined grain size and improved strength.