

Термины и определения

Нанонаука (*наука о наносистемах и наноструктурах*) - изучение феномена и манипуляции материалов на атомном, молекулярном и макромолекулярном уровнях, при которых свойства материалов значительно изменяются по сравнению с их свойствами на более крупном уровне.

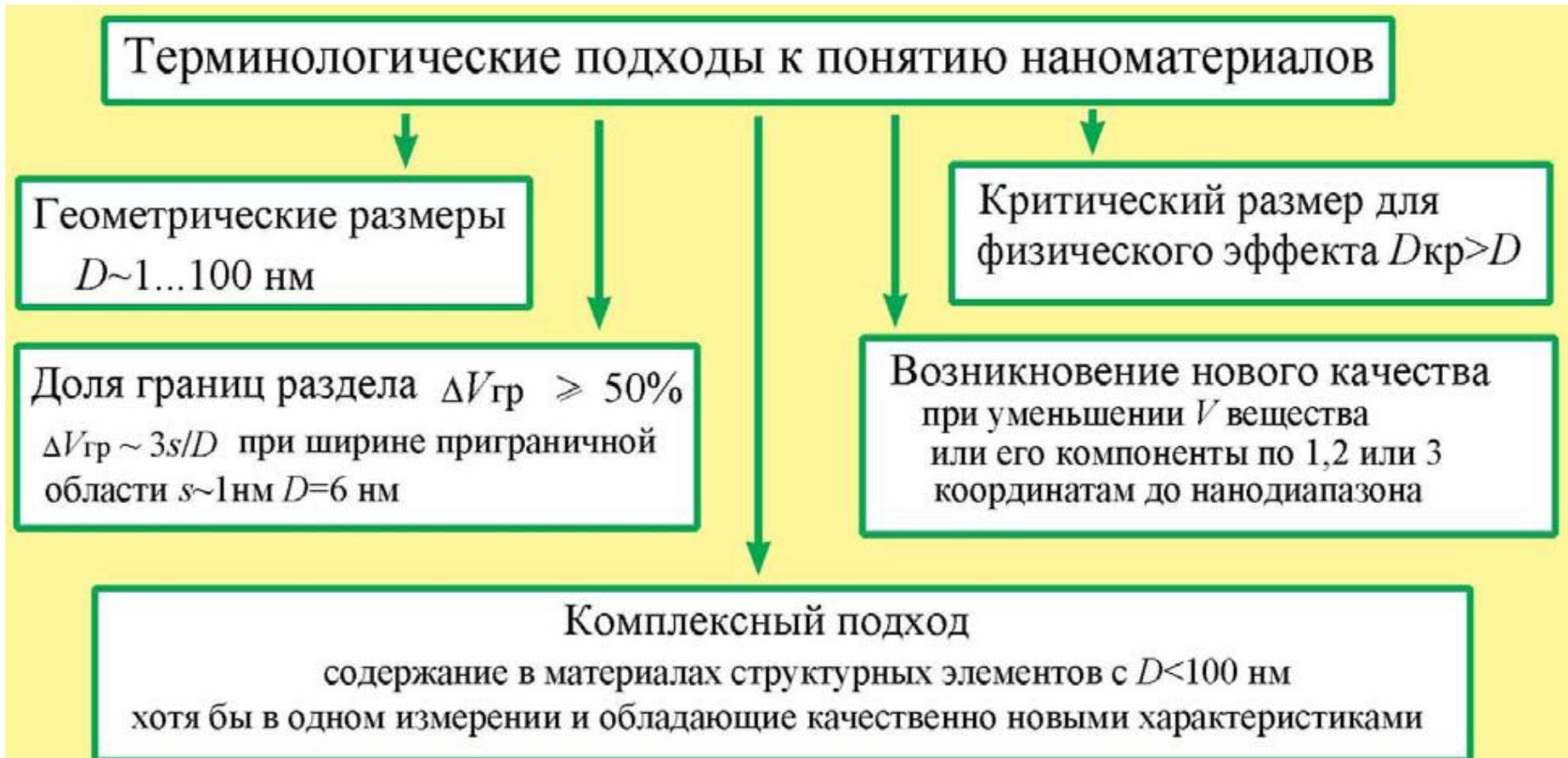
Нанотехнология - совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба;

Основные виды нанотехнологий

Нanomатериалы	Нанопроизводство
Наномедицина	Нанотоксикология
Нанoeлектроника	Нанoeкология
Молекулярная электроника	Нанобиология
Органическая электроника	Квантовые компьютеры
Нанofотоника	Нанoeнергетика
Нанобиотехнология	Нанoуправление
Нанofабрикация	Нанороботы
Нанометрология	Нановооружение

Терминологические подходы к понятию наноматериалов

Наноматериалы - материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.



ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Свойства	Отклик материала на уменьшение размера структурного элемента
Фазовые превращения	Понижение температуры фазовых превращений, в том числе температуры плавления
Кинетические	Аномально высокие значения коэффициентов диффузии, повышение теплоемкости, снижение теплопроводности
Электрические	Повышение электросопротивления, возрастание диэлектрической проницаемости
Магнитные	Возрастание коэрцитивной силы, магнитосопротивления, появление супермагнетизма
Механические	Повышение предела текучести, твердости, вязкости разрушения, износостойкости, проявление сверхпластичности при высоких температурах

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

(продолжение)

Оптические	Увеличение поглощающей способности в УФ части спектра, Изменение окраски объектов
Прочие	возможность легирования нерастворимыми или слабо растворимыми при обычных условиях элементами за счет повышенного коэффициента граничной диффузии и более развитой зеренной структуры
	способность к самосборке
	возрастание реакционной способности

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

(ОГРАНИЧЕНИЯ!!!!)

- **хрупкость** наноматериалов;
- **склонность к межкристаллитной коррозии** из-за очень большой объемной доли границ зерен;
- **нестабильность** структуры наноматериалов, а следовательно, нестабильность их физико-химических и физико-механических свойств (при термических, радиационных, деформационных и т. п. воздействиях неизбежны рекристаллизационные, релаксационные, сегрегационные и гомогенизационные процессы, а также явления распада, фазовых превращений, спекания и заплывания нанопор и нанокапилляров, аморфизации или кристаллизации);
- **комкование (слипание) частиц нанопорошка** в агломераты, что может осложнить получение материалов с заданной структурой и распределением компонентов.....

Увеличение прочностных характеристик материала в соответствии с деформационным (дислокационным) механизмом упрочнения

Закон Холла-Петча

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_y D^{-n}$$

где σ_0 – внутреннее напряжение, препятствующее движению дислокации; k_y – коэффициент, связанный с проницаемостью границы зерна движению дислокаций; D – размер зерна; величина n изменяется от 1/2 (классический закон Холла–Петча) до значений, лежащих в интервале 1/4 – 1. Счи-

Увеличение прочностных характеристик материала в соответствии с деформационным (дислокационным) механизмом упрочнения

Закон Холла-Петча

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot b \cdot G \cdot \sqrt{\rho}$$

σ_0 – предел текучести до упрочнения,

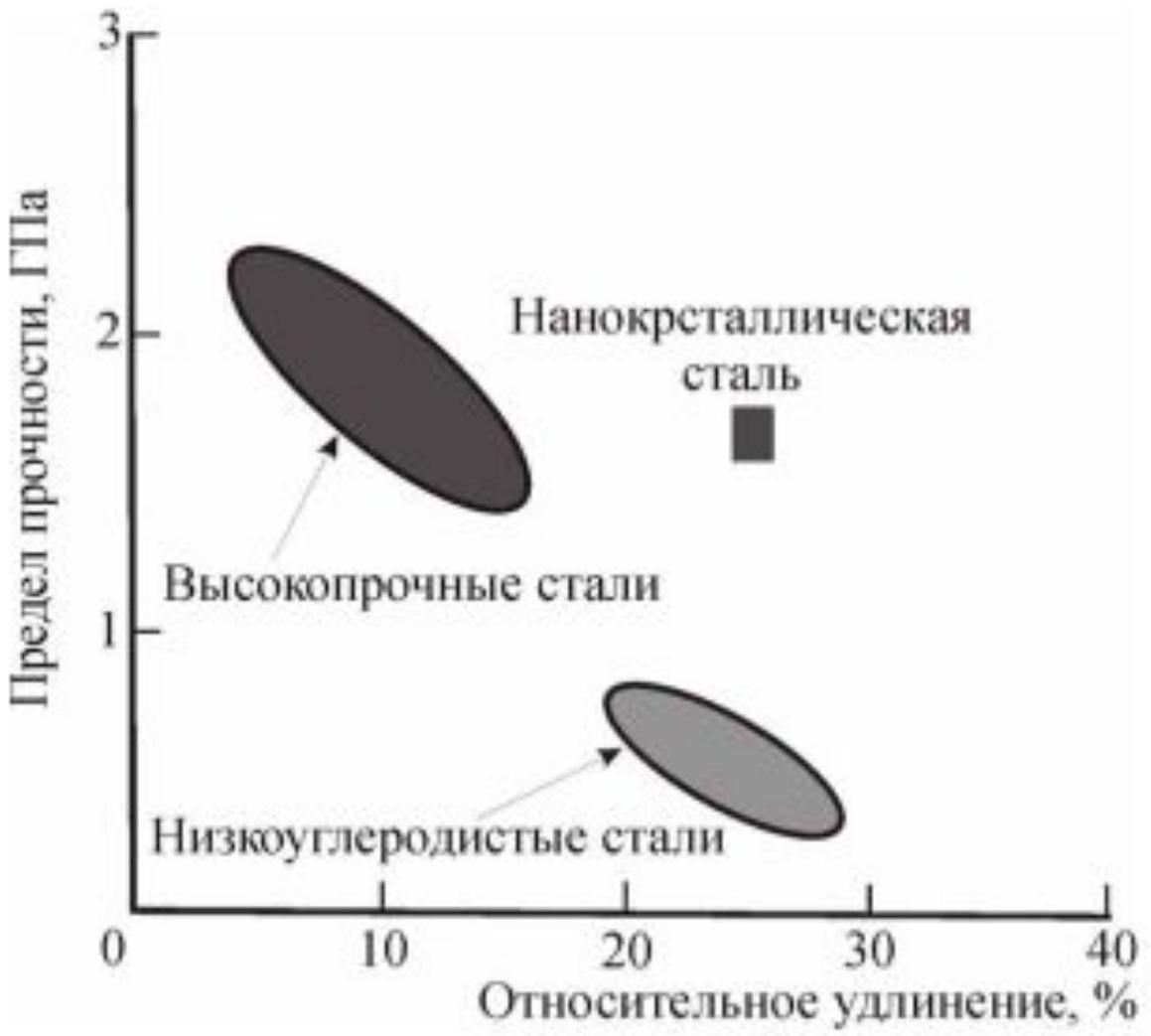
α – коэффициент, учитывающий вклад других механизмов торможения,

b - вектор Бюргерса,

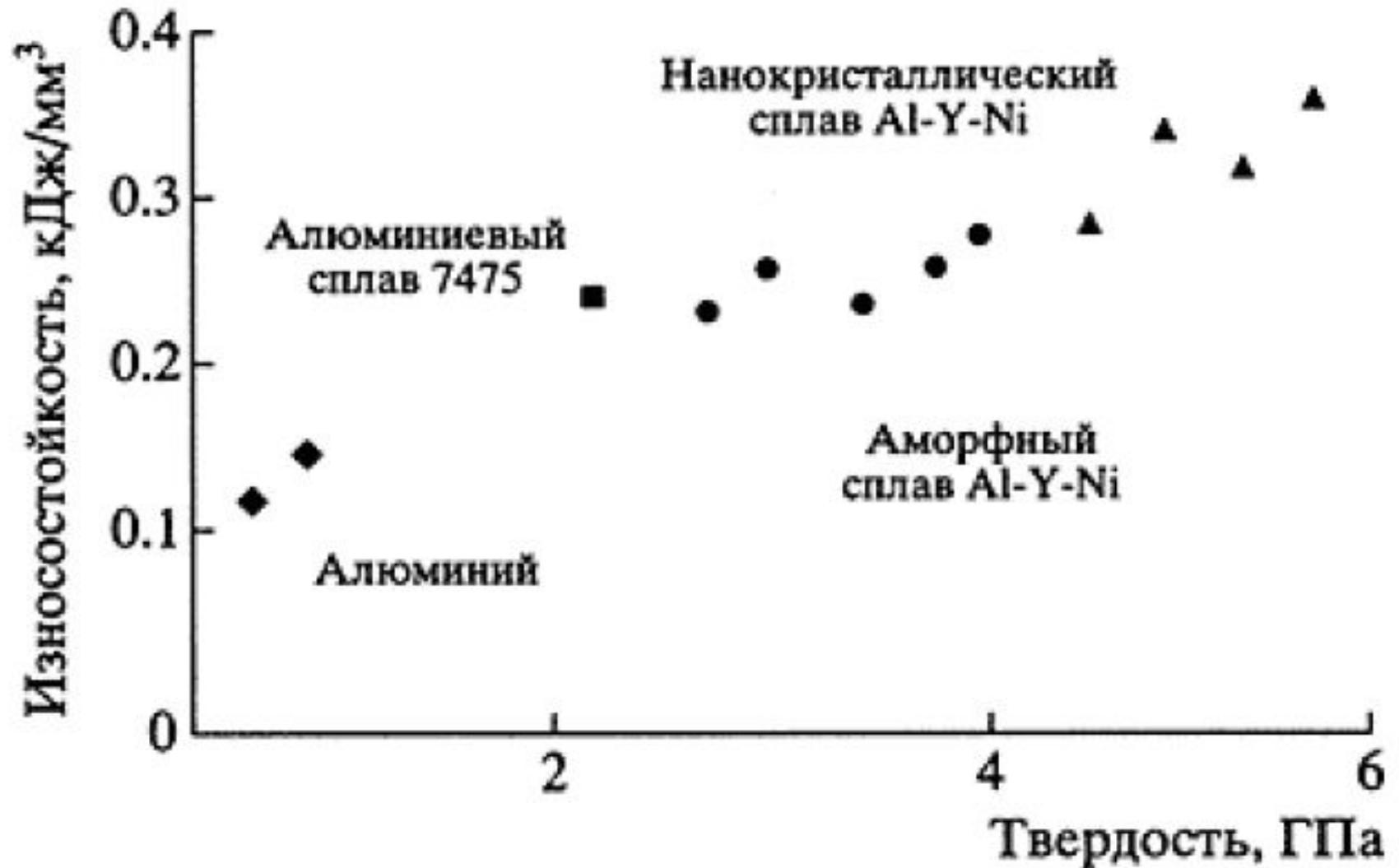
G – модуль сдвига,

ρ – плотность дислокаций.

Уникальный комплекс механических свойств наноструктурных сталей в сравнении с крупнозернистыми аналогами



Износостойкость наноструктурных материалов на примере алюминиевых сплавов



Интенсивная пластическая деформация (ИПД) – методы обработки, связанные с достижением чрезвычайно высоких степеней сдвиговой пластической деформации в условиях больших приложенных давлений при относительно низких температурах (обычно меньше $(0,3 \div 0,4)$ от температуры плавления) и позволяющие получать объемные УМЗ материалы с комплексом высоких механических свойств .

Требования к методам ИПД

- преимущественное формирование ультрамелкозернистых структур с большеугловыми границами зерен (именно в этом случае наблюдаются качественные изменения свойств материалов),
- необходимость обеспечения стабильности свойств материала за счет однородного формирования наноструктур по всему объему.
- отсутствие механических повреждений и трещин несмотря на интенсивное пластическое деформирование материала.

Влияние методов и условий деформации на тип и размер структурных составляющих материала

Фактор влияния	Методы деформации		Тип измельченной структуры
Общее значение накопленной степени деформации, ϵ	Прокатка, волочение со степенью $\epsilon \sim 3-6$		Кристаллические МФ
	Гидроэкструзия $\epsilon \geq 2$		АНФ ($\epsilon \sim 6-8$)
	Прокатка фольг, волочение нитей $\epsilon > 6$		СМК
	Кручение тонких (0,1мм) дисков под давлением на 3-5 оборотов РКУ прессование за 4-12 проходов Размол порошков в шаровых мельницах		СМК НК
Скорость деформации, $\xi, \text{с}^{-1}$	Квазистатическая $\xi \sim 10^{-2} \div 10^2 \text{с}^{-1}$	Кручение под давлением, РКУ прессование	Зерна СМК и НК
	Скоростная $\xi \sim 10^4 \text{с}^{-1}$	Магнитоимпульсная штамповка	МФ
	Высокоскоростная $\xi \sim 10^6 \text{с}^{-1}$	Штамповка взрывом	МФ
Квазигидростатическое давление, ГПа	(1,5÷2) ГПа (РКУ прессование)		Зерна СМК и НК
	(2÷6) ГПа (Гидроэкструзия)		МФ
	(3÷10) ГПа (Кручение под давлением)		Зерна СМК и НК
	(10÷70) ГПа (Штамповка взрывом)		МФ
Масштабный фактор	Объемные образцы с поперечным сечением $> 1 \text{мм}$		СМК зерна и субзерна
	Тонкостенные образцы с поперечным сечением $\ll 1 \text{мм}$		Зерна НК и АНФ
Характер деформации	Квазимонотонная деформация – направление вытяжки не меняется		Преимущественно МФ
	Существенно немонотонная деформация – направление деформации меняется на 180° , т.е. вытяжка сменяется сжатием		
	Немонотонная деформация (направление силы деформации меняется под углом близким к 90°)		Преимущественно зерна СМК
МФ – малоугловые фрагменты; АНФ – аморфные нанофрагменты; СМК – субмикроструктурные; НК – нанокристаллические,			

Правила обработки заготовок методами ИПД

1. Низкие температуры обработки

(как правило, меньше $0,4T_{\text{пл}}$, $T_{\text{пл}}$ - температура плавления).

2. Высокая степень накопленной деформации

(истинная деформация сдвига $\sim(6 - 8)$).

3. Высокие гидростатические давления

(> 1 ГПа \rightarrow целостность и деформируемость заготовок).

4. Турбулентности течения металла

(на макро- и микроуровнях).

5. Наличие атомной структурой материала, характеризующейся низким значением энергии дефекта упаковки.

Основные правила формирования УМЗ структуры материалов методами ИПД

1. Проведение деформирования при низких температурах (как правило, меньше $0,4T_{\text{пл}}$, $T_{\text{пл}}$ - температура плавления).

Только в этих условиях возможно достижение высокой плотности дислокаций 10^{14} м^{-2} и выше вплоть до предельных значений $10^{16} - 10^{17} \text{ м}^{-2}$, что необходимо для формирования УМЗ структуры. Повышение температуры обработки ведет к резкому уменьшению плотности дислокаций и увеличению ($> 1 \text{ мк}$) размера зерен

Основные правила формирования УМЗ структуры материалов методами ИПД

2. Высокая интенсивность деформации, обеспечивающая эволюцию дислокационной структуры.

Степень деформации при обработке (истинная деформация) должна превышать значение 6 – 8.

Хотя сильное измельчение микроструктуры и достижение плотности дислокаций более 10^{14} м^{-2} происходят уже при значении истинной деформации 1 – 2, однако формирование УМЗ структуры с большеугловыми границами имеет место только при дальнейшем деформировании

Основные правила формирования УМЗ структуры материалов методами ИПД

3. Высокие (> 1 ГПа) гидростатические давления, которые способствуют повышению деформируемости обрабатываемого материала и, следовательно, обеспечивают целостность заготовок даже после очень больших деформаций .

Кроме того, давление оказывает влияние на диффузию и сдерживает аннигиляцию дефектов кристаллической решетки при деформации.

Основные правила формирования УМЗ структуры материалов методами ИПД

4. Формирование равноосных ультрамелких зерен зависит от турбулентности течения металла.

На макроуровне турбулентность связана с немонотонным характером деформации, обеспечивающим активизацию новых систем скольжения и перестройку фрагментов зерен в равноосные ультрамелкие зерна с неравновесными границами .

На микроуровне турбулентность выражена вращением и перемещением зерен.

Основные правила формирования УМЗ структуры материалов методами ИПД

5. Измельчение зерен также связано с атомной структурой материала.

Упорядочение сплавов или снижение энергии дефекта упаковки (ЭДУ) при прочих равных условиях способствует повышению плотности накопленных дислокаций и значительно снижает размер получаемых зерен

НДС материала в процессах ИПД

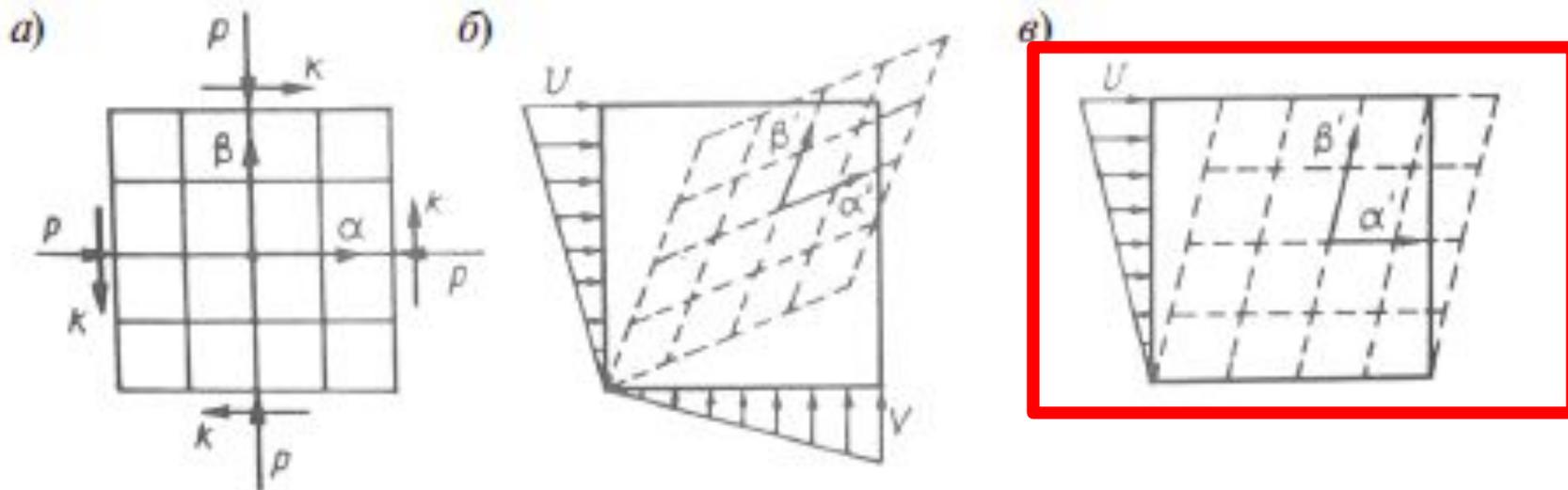


Рис. 3.4. Схема однородного напряженного состояния (а) и соответствующие ему кинематические состояния чистого (б) и простого (в) сдвига

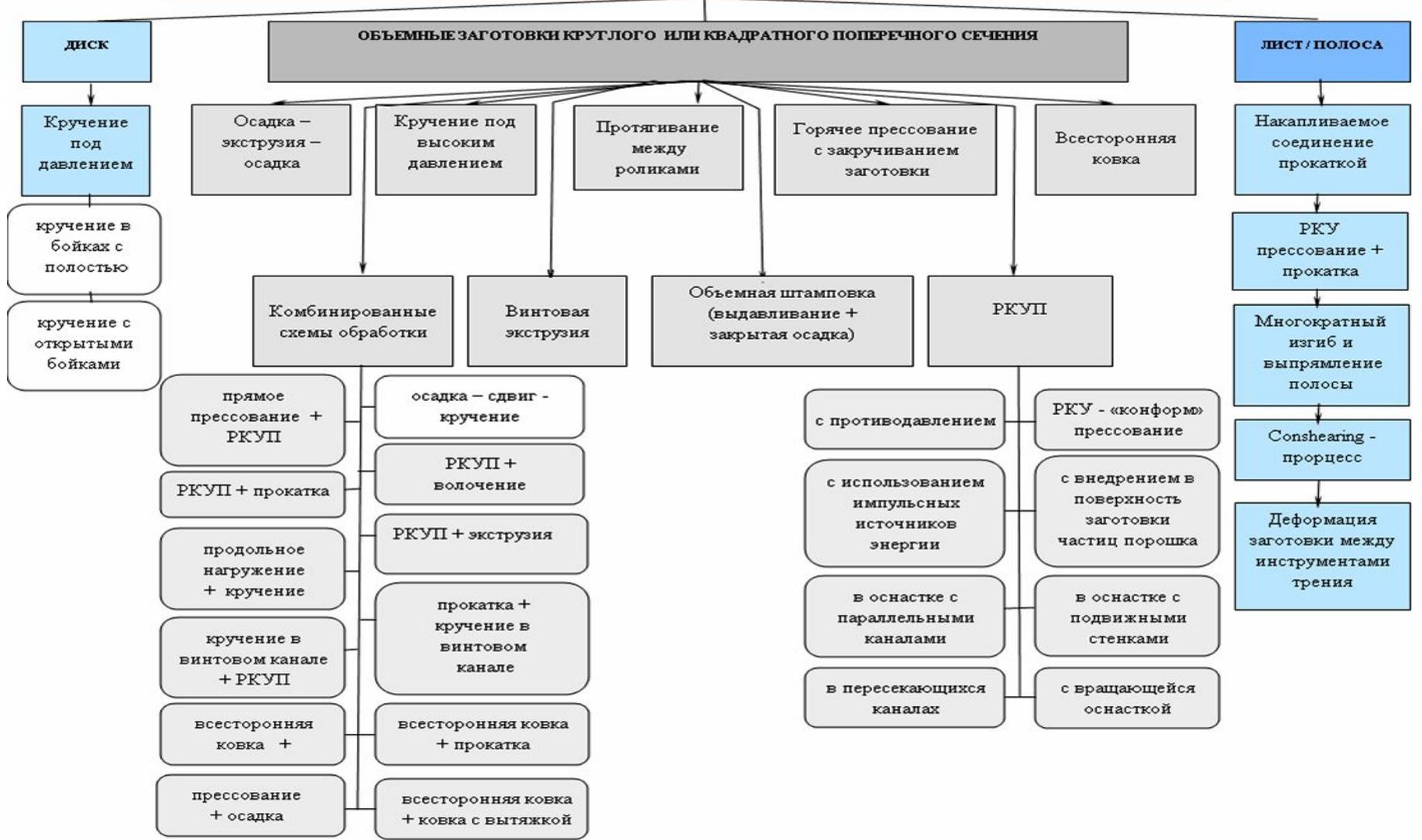
При простом сдвиге одно из кристаллографических направлений α' остается параллельным направлению макроскопических α - линий скольжения.

Особенности схемы пластического структурообразования «простой сдвиг»

- 1. Схема простого сдвига обеспечивает возможность многократного циклического деформирования путем изменения направления действия касательных напряжений на границах деформируемого объема после очередного цикла обработки.**
- 2. Неизменность в процессе деформирования сечения, перпендикулярного плоскости течения.**
- 3. Направленность пространственного развития деформации, определяемая одной системой линий скольжения.**

Современные способы формирования УМЗ структуры объемных материалов (основные!!!)

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ УМЗ СТРУКТУРЫ ОБЪЕМНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ЗАГОТОВОК



СПОСОБЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Дискретные способы

1.1. ИПД кручением

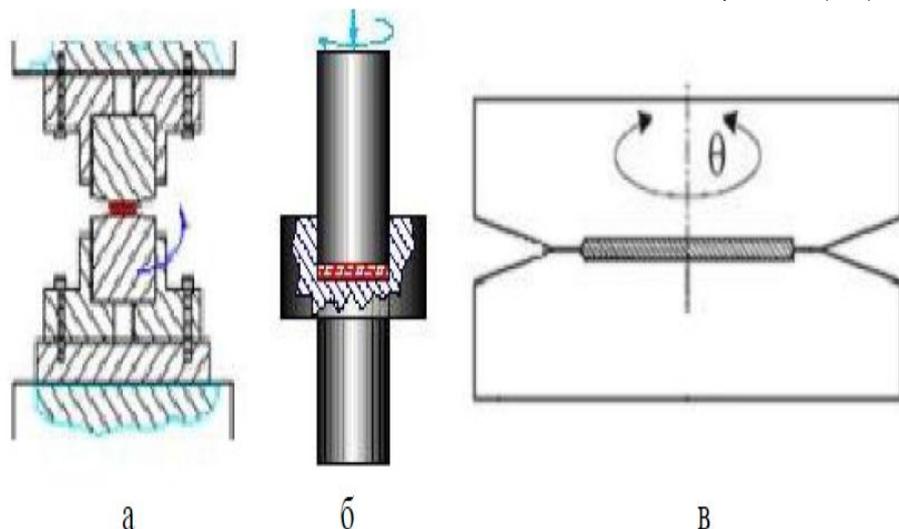
1.2. ИПД в процессе равноканального углового прессования

1.3. ИПД в процессе в процессе экструзии или осадки

1.4 ИПД в процессе прокатки

1.2. Непрерывные способы

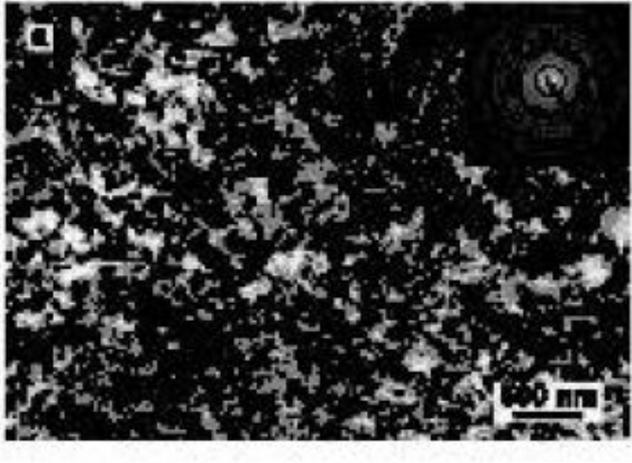
Интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК)



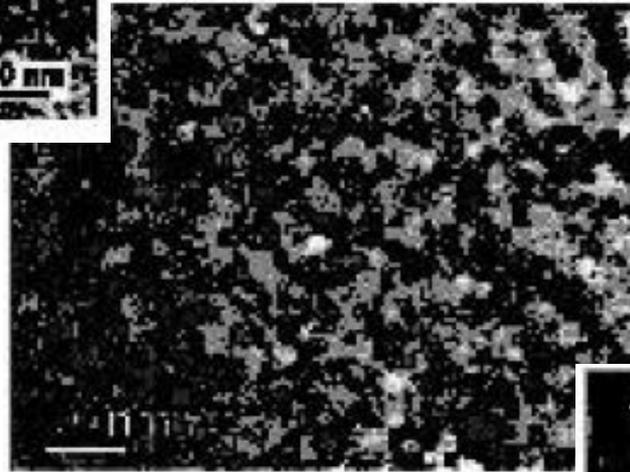
а – с открытыми бойками;
 б - с боковой поддержкой;
 в – с ПОЛОССТЬЮ

Технологические особенности процесса	Форма и размеры заготовок	Преимущества	Технологические ограничения
1. Гидростатическое давление в несколько ГПа (обычно до 10 ГПа). 2. Многоцикловая обработка. 3. Деформация в холодном состоянии или при повышенных температурах.	Диск: диаметр 10-20 мм; толщина 0,2-0,5 мм.	Существенное измельчение структурных составляющих при деформации в пол- или один полный оборот.	1. В процессе деформации толщина исходных образцов уменьшается в 2-3 раза. 2. Размер заготовок. 3. Интенсивное изнашивание оборудования (бойки). 5. Проскальзывание между бойками и образцом. 6. Дискретность и низкая технологичность процесса.

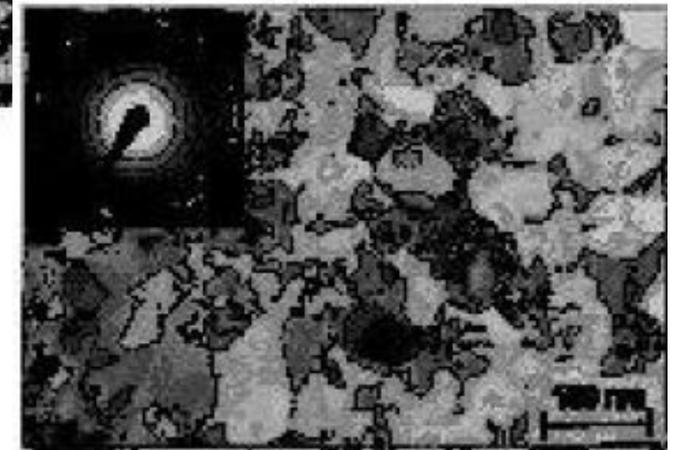
Примеры микроструктуры сплавов
после ИПДК



BT 1



TiNi



BT-6

Степень деформации при ИПДК

В случае ИПДК образцов, имеющих форму дисков радиусом R [мм] и толщиной L [мм] истинная логарифмическая степень деформации e рассчитывают по формуле:

$$e = \ln \left(\vartheta \frac{R}{L} \right)$$

где ϑ - угол вращения одного из б

При расчете степени сдвиговой деформации в некоторой точке X , расположенной на расстоянии R_x [мм] от оси образца, используют формулу:

$$\varepsilon_s = 2\pi N \left(\frac{R_x}{L} \right)$$

где N – число оборотов бойка.

Для сопоставления степени сдвига развитыми при других схемах деформирования, величину ε_s в сочетании со степенями деформации, преобразуют в эквивалентную деформацию определяемую, как:

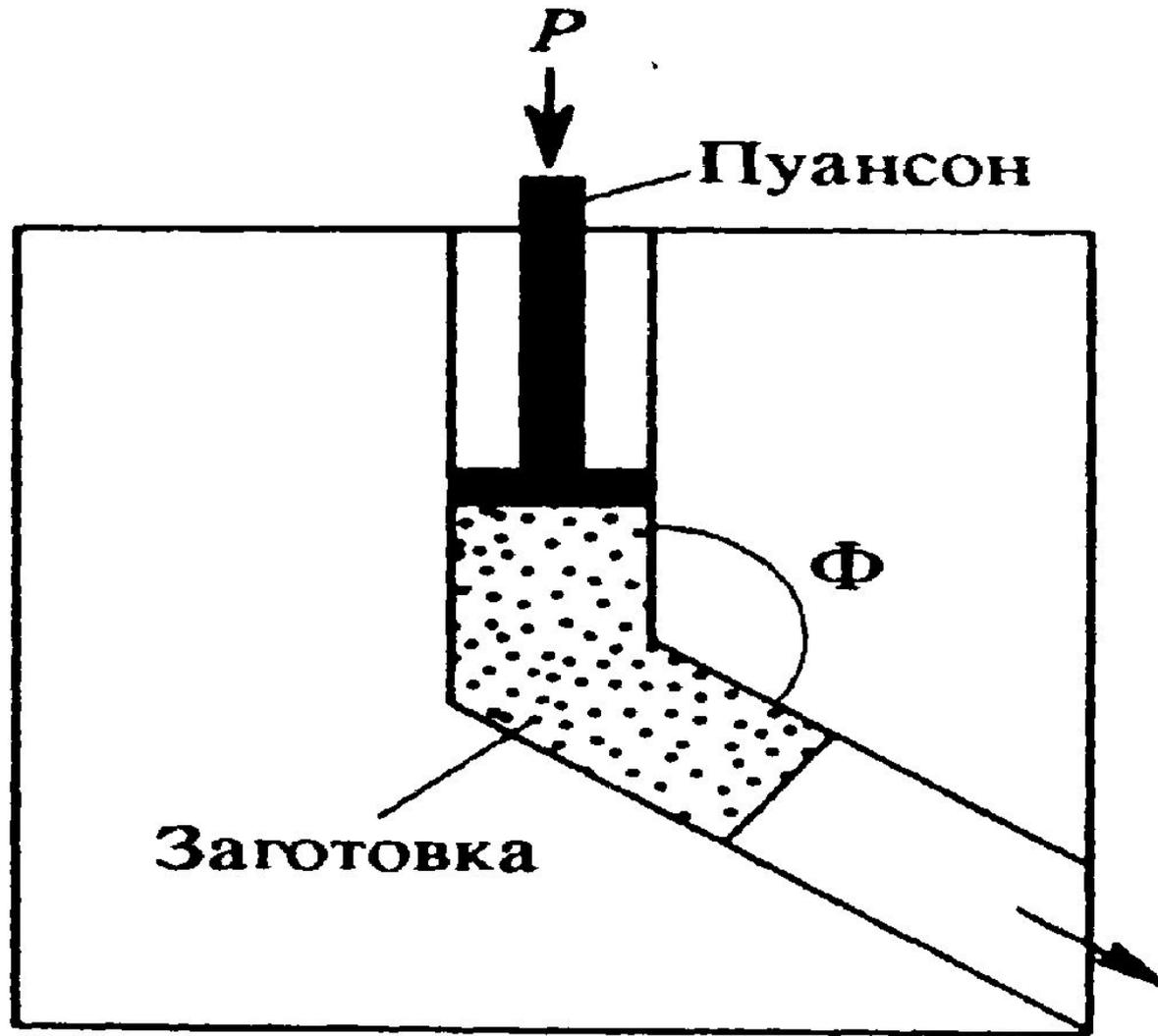
$$\varepsilon_{eq} = \frac{\varepsilon_s}{\sqrt{3}}$$

Замечания

1) расчеты с помощью данного уравнения приводят к выводу о том, что величина деформации должна изменяться линейно от нуля в центре образца до максимального значения на концах его диаметра, однако на самом деле это, как отмечалось выше, экспериментально часто не наблюдается;

2) в процессе деформации исходная толщина образца под воздействием высокого сжимающего давления уменьшается примерно в 2 раза, поэтому использование, как это обычно делается, в качестве l исходной толщины образца занижает рассчитанные значения величины деформации по сравнению с истинными значениями.

Равноканальное угловое прессование
(РКУП)



РАВНОКАНАЛЬНОЕ УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ (РКУП)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

1. Угол пересечения каналов инструмента: 90-150 град.
2. Многоцикловая обработка.
3. Деформация в холодном состоянии или при повышенных температурах.

РАЗМЕР И ФОРМА ЗАГОТОВОК

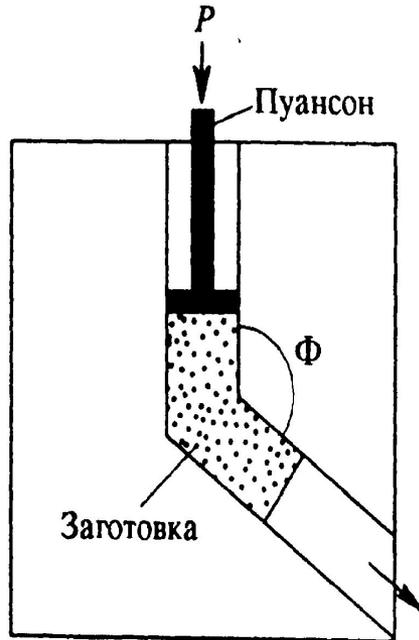
Объемные заготовки круглого или квадратного сечения: диаметр или диагональ до 20 мм; длина до 100 мм.

ДОСТОИНСТВА

1. Деформация простым сдвигом и формирование однородной СМК или НК микроструктуры с большеугловыми неравновесными границами.
2. В процессе деформации объем и геометрические размеры исходных образцов сохраняются.

НЕДОСТАТКИ

1. Ограниченный размер УМЗ образцов.
2. Дискретность и низкая технологичность процесса, обусловленная необходимостью после каждого прохода вынимать заготовку и повторно помещать ее во входной канал оснастки с учетом ориентации, зависящей от выбранного маршрута.



Установки для реализации процесса РКУП



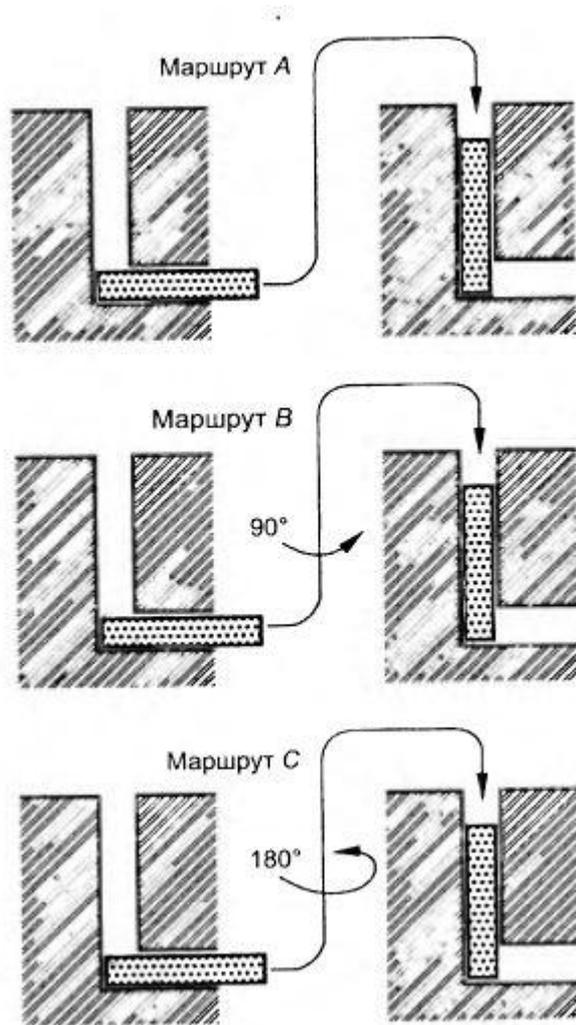
Параметры образцов

- Длина 70 – 150 мм;
- Форма поперечного сечения: круг, квадрат;
- Диаметр образцов (или диагональ) – до 20 мм;



Рис. Общий вид образцов труднодеформируемых УМЗ материалов:
а – характерный вид дефектных образцов; б, в, г – бездефектные образцы
нитинола, сплава ВТ6 и вольфрама, соответственно,
полученные по рациональным режимам РКУП

Маршруты обработки



На практике используют следующие основные маршруты обработки:

- **маршрут А:** ориентация заготовки неизменна при каждом проходе;
- **маршрут В_А и В_С:** после каждого прохода заготовку поворачивают вокруг своей оси на угол 90° в разных направлениях или в одном направлении соответственно;
- **маршрут С:** заготовку каждый раз поворачивают на угол 180°.

Степень деформации

$$\frac{P}{\sigma_T} = \Delta \epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg}(\phi/2),$$

где P – приложенное давление, σ_T – напряжение течения деформируемого материала.

Поскольку при РКУ прессовании заготовка продавливается через пересекающиеся каналы несколько раз, то общая степень деформации

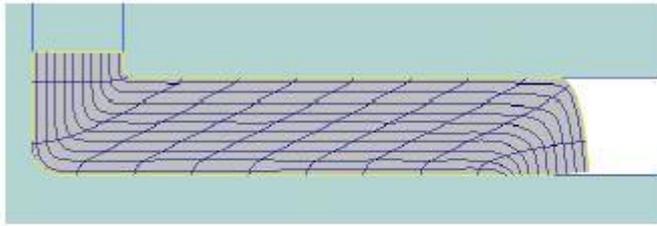
$$\epsilon_N = N \Delta \epsilon_i,$$

где N – число проходов.

При расчете эквивалентной деформации использовали подход Генки

$$e_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_1)^2 + (e_2)^2 + e_1 e_2}$$

где e_1 и e_2 - главные деформации.



а)



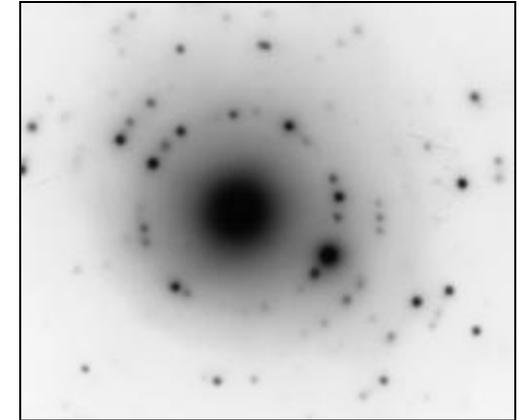
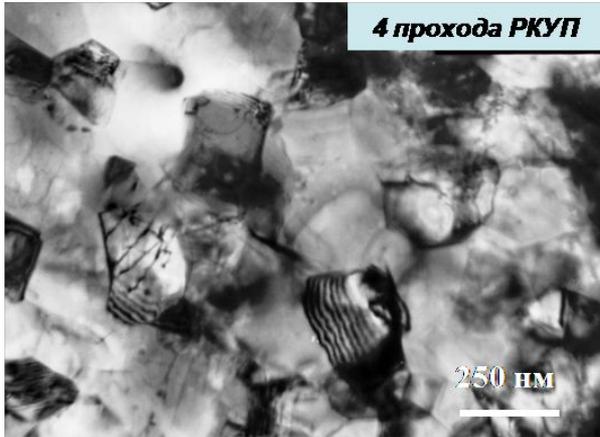
б)

Рис. ... Изменение исходной сетки в процессе равноканального углового прессования: а) – компьютерная модель; б) – эксперимент.

- Многофакторность обработки: угол пересечения каналов, их форма и размеры, радиус скругления, количество проходов, маршрут, температура, смазка, параметры материала – исходная структура, тип кристаллической решетки, прочность, пластичность и т.д.

РКУП конструкционных сталей

1. Формирование наноструктуры



Светлопольное изображение

Кольцевая электронограмма
стали марки 20

2. Уникальный комплекс высоких механических свойств

Число проходов РКУП	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²
Исходное состояние	470	317	65	179
1	694	642	57	59
2	725	703	53	89
3	777	763	52	98
4	844	816	52	96

РКУП титана

Первые зубные имплантаты из нанотитана

(более **900** успешных операций в Чехии)



Уникальные особенности:

- высокая биосовместимость;
- размер: 2,4 мм вместо 3,5 мм;
- прочность: в 2 раза выше аналогов;
- легкость и изящность конструкции.

Изготовитель нанотитана:

ученые ИФПМ ГОУ ВПО «УГАТУ» (г. **Уфа**) (НШ Р.З. Валиева).

Изготовитель имплантатов:

ученые из **США в Чехии** .

Равноканальное угловое прессование с противодавлением

(обеспечиваемым вязкопластической средой или воздействием жестким пуансоном)

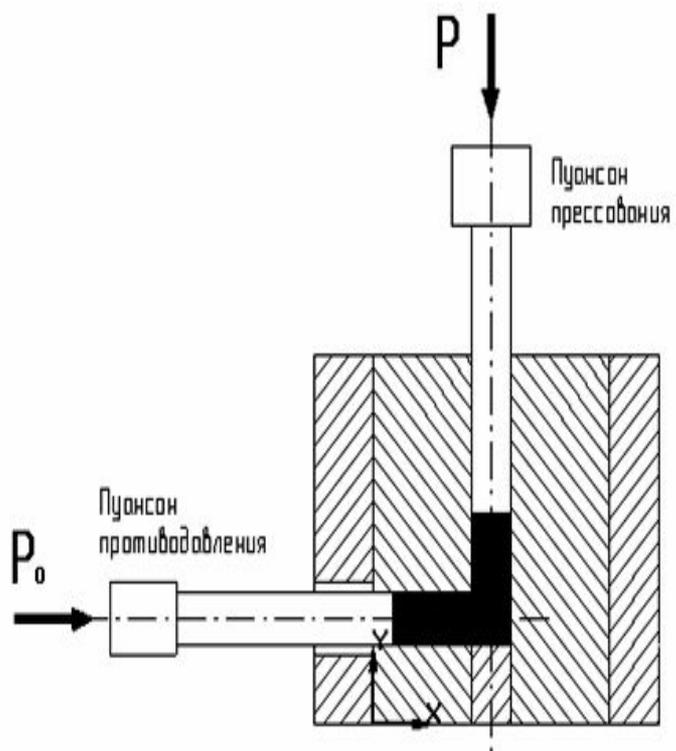
ДОСТОИНСТВА

(по сравнению с РКУП).

1. Снижение растягивающих напряжений и повышение деформируемости заготовки.
2. Снижение вероятности разрушения обрабатываемой заготовки.
3. Отсутствие искажений концевых частей заготовки.

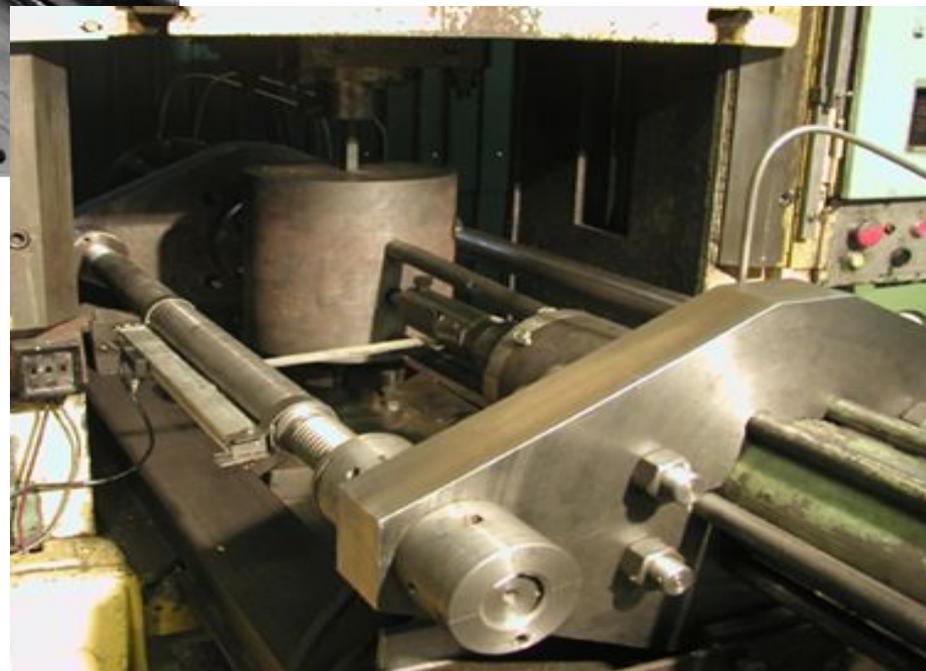
НЕДОСТАТКИ

1. Небольшой размер УМЗ образцов.
2. Повышенная сложность инструмента и его изготовления.
3. Сложность извлечения заготовки и значительный рост трудоемкости процесса при многократной обработке.
4. Дискретность и низкая технологичность процесса.



Установка для реализации процесса РКУП

с противодавлением



Положительное влияние противодавления на характеристики УМЗ материалов

Таблица Влияние вида обработки на твердость алюминиевого сплава 6061

Вид обработки	Твердость НВ, МПа, в продольном сечении
Исходное состояние (закаленное)	690
Стандартная упрочняющая обработка	1215
После РКУ прессования с противодавлением 1 проход	1450

РКУ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОСНАСТКОЙ

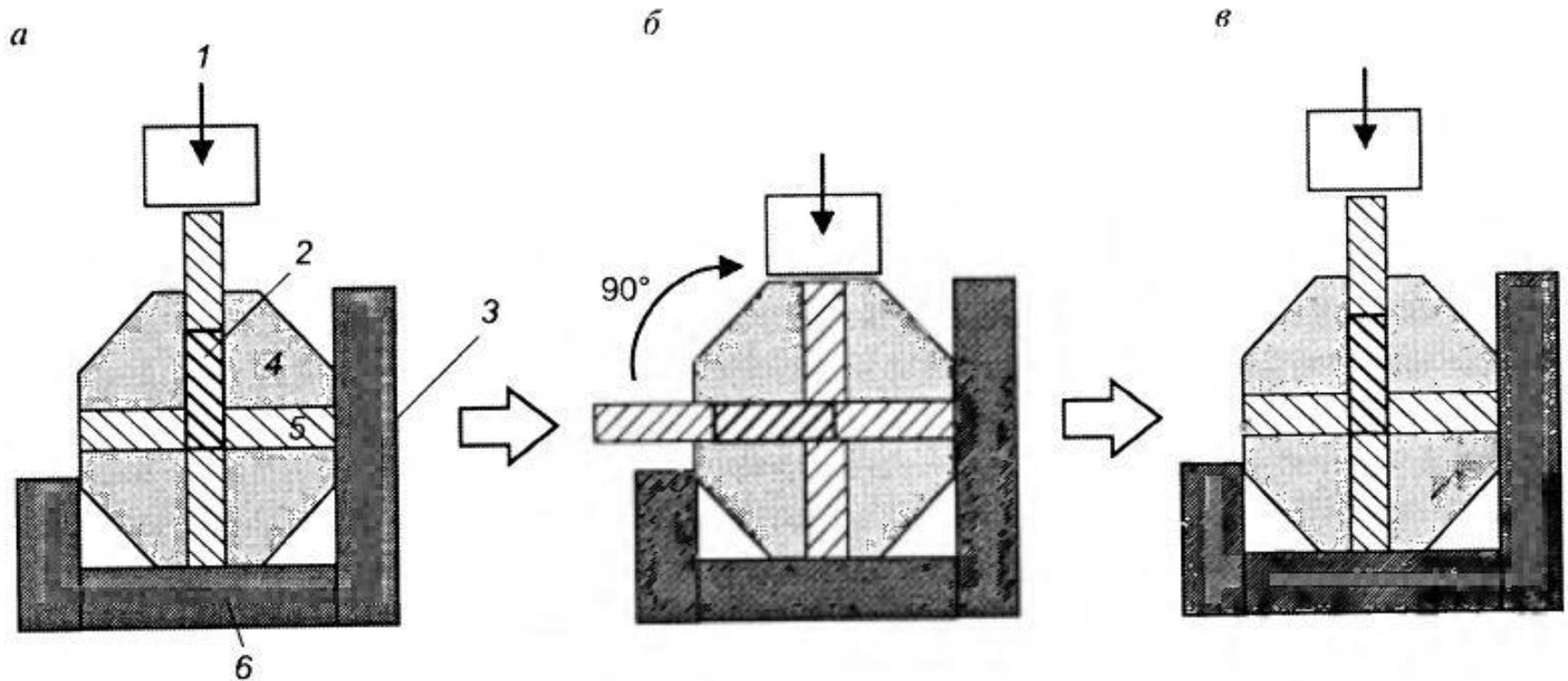


Рис. Схема РКУ прессования с вращающейся оснасткой:

а – 1-й проход: 1 – поршень; 2 – заготовка (образец); 3 – стенка; 4 – оснастка; 5 – пуансон; 6 – основание оснастки; *б* – поворот оснастки на угол 90° ; *в* – 2-й проход [42]

Преимущества

(в сравнении с традиционным РКУП)

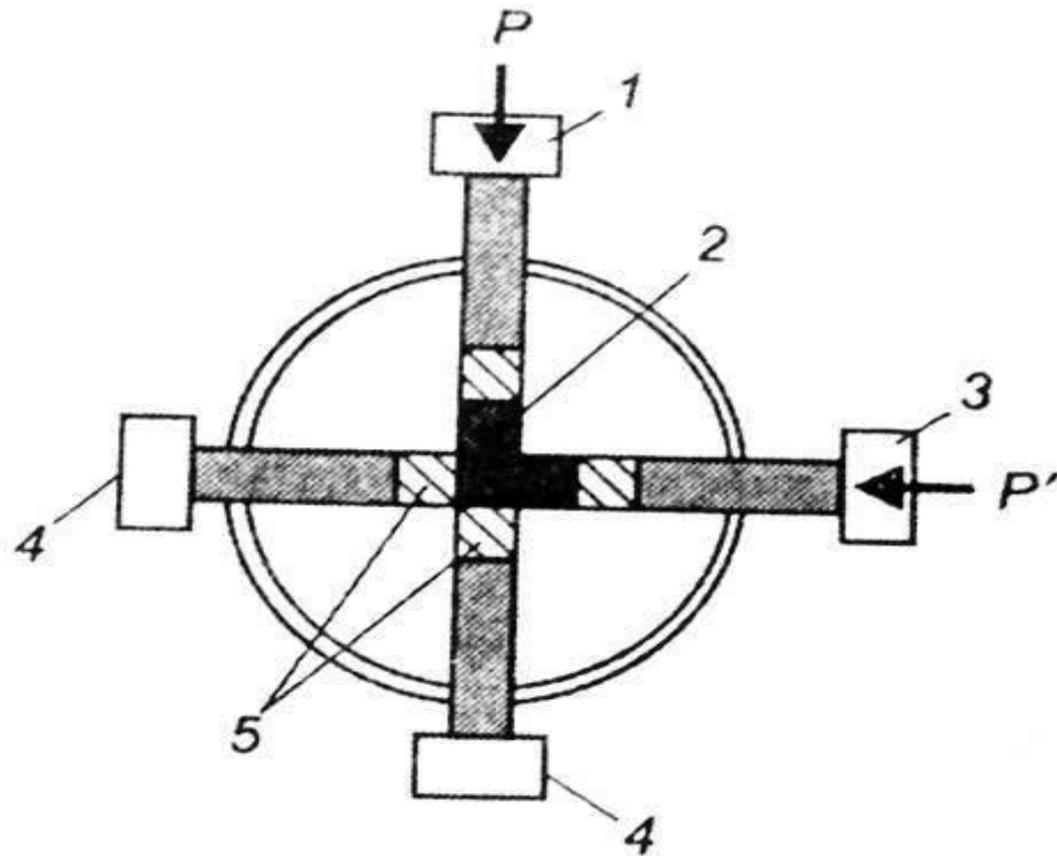
- существенно упрощается процесс прессования;
- исчезает необходимость вынимать и вновь вставлять заготовку после каждого цикла прессования;
- появляется возможность точно контролировать температуру деформации;
- время обработки уменьшается.

Недостатки

(в сравнении с традиционным РКУП)

- небольшое отношение длины к поперечному размеру заготовок приводит к формированию обширной зоны низкой проработки головной и хвостовой частей материала и, следовательно, к существенной неоднородности его структуры и свойств.
- возможность реализации только маршрута А (ориентация заготовки неименна при каждом проходе) и пересечения каналов оснастки только под прямым углом, что значительно сужает границы применимости схемы.
- сложности, связанные с обновлением смазочного слоя в процессе обработки.

РКУП ПУТЕМ БОКОВОЙ ЭКСТРУЗИИ



В оснастке с параллельными каналами

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

1. Угол пересечения каналов инструмента: 90-150 град.
2. Многоцикловая обработка.
3. Деформация в холодном состоянии или при повышенных температурах.

РАЗМЕР И ФОРМА ЗАГОТОВОК

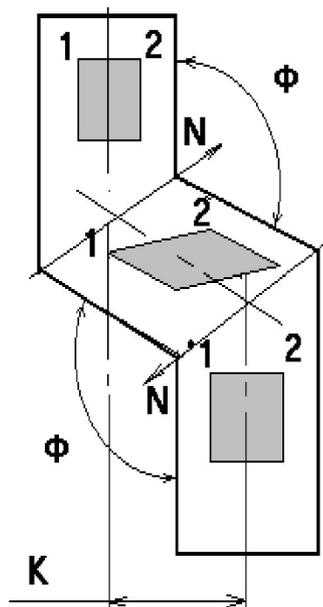
Объемные заготовки круглого или квадратного сечения.

ДОСТОИНСТВА

1. Одновременная сдвиговая деформация заготовки в двух очагах деформации.
2. В процессе деформации объем и геометрические размеры исходных образцов сохраняются.

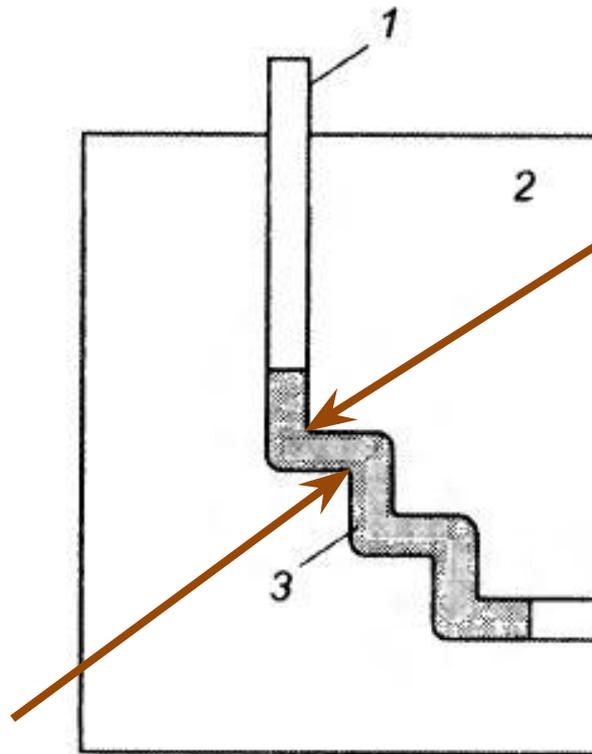
НЕДОСТАТКИ

1. Ограниченный размер УМЗ образцов.
2. Дискретность и низкая технологичность процесса.



N-направление
сдвига

РКУП в многоканальной оснастке

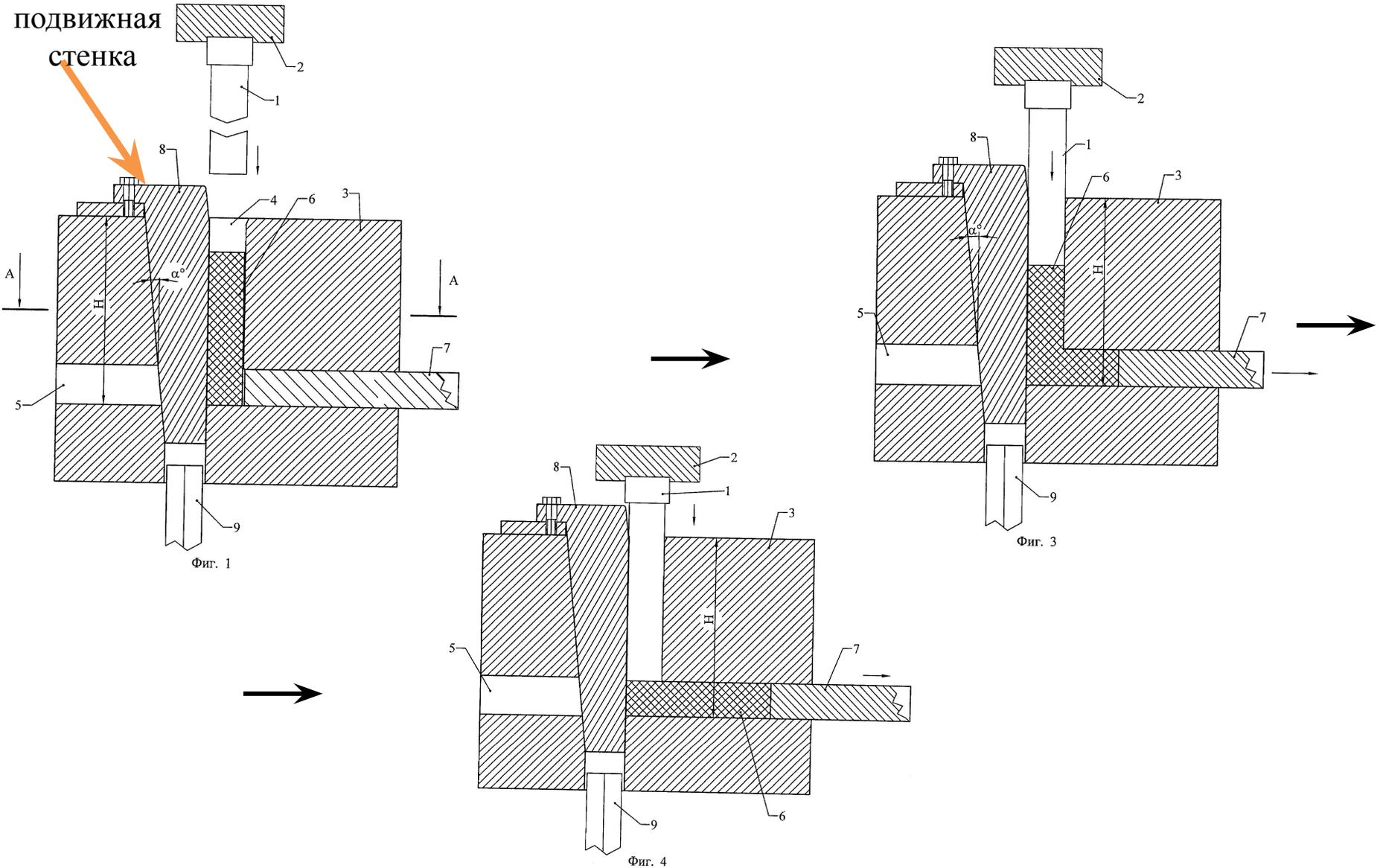


Аналогия реализации маршрута С – поворот заготовки на 180°

Рис. Схема многопроходной оснастки:
1 – плунжер; 2 – оснастка; 3 – образец

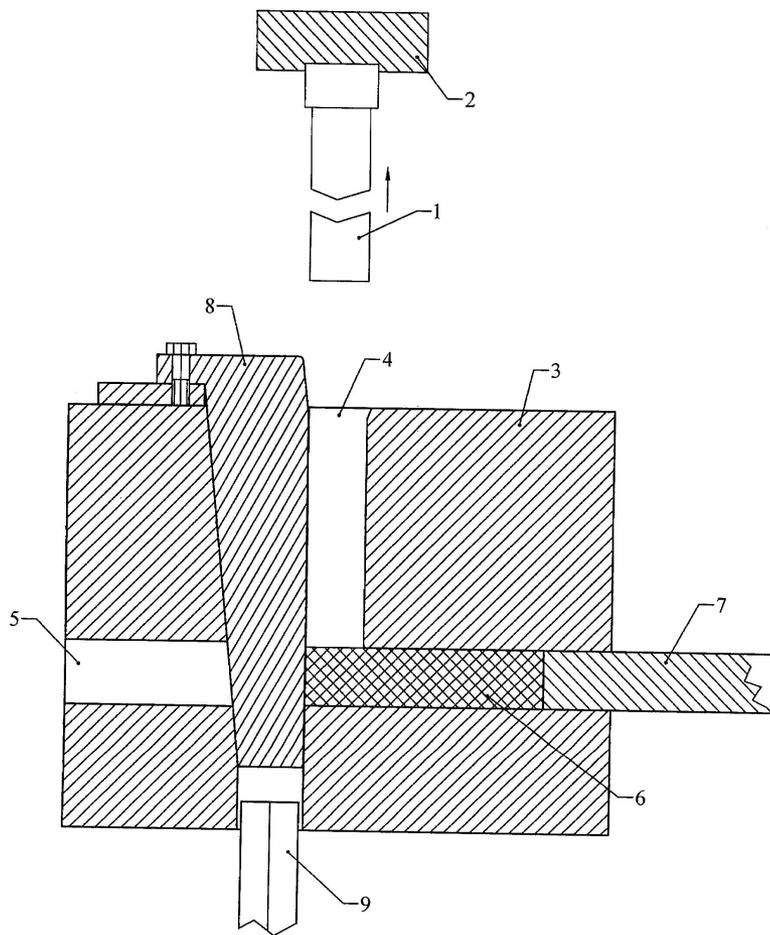
Конструкция установки для РКУП с подвижной стенкой

(сложность используемого оборудования!!!)

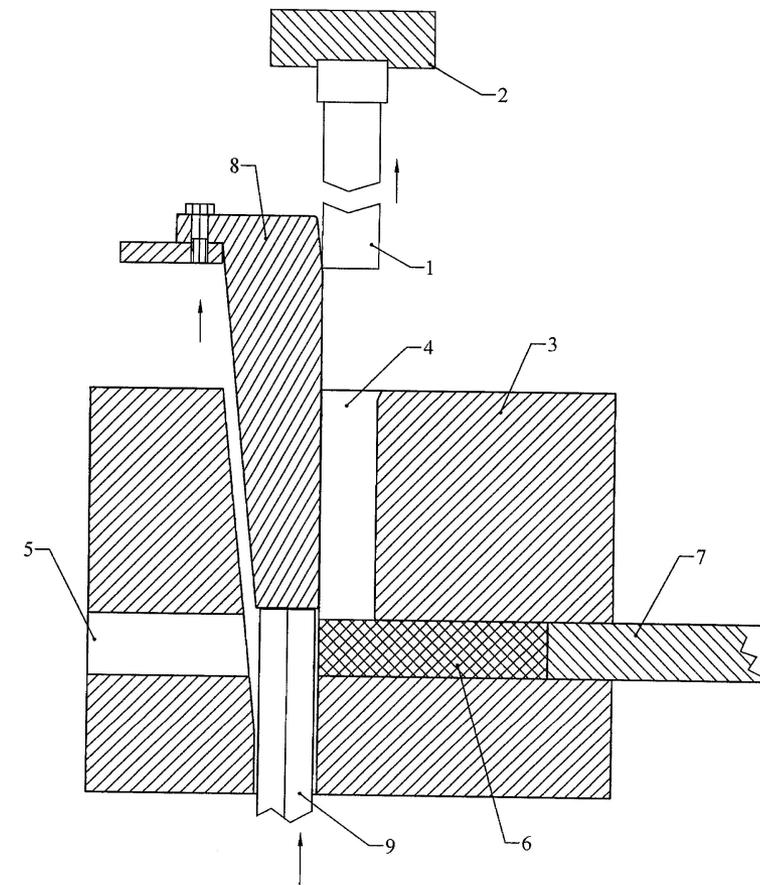


Конструкция установки для РКУП с подвижной стенкой

(сложность используемого оборудования!!!)

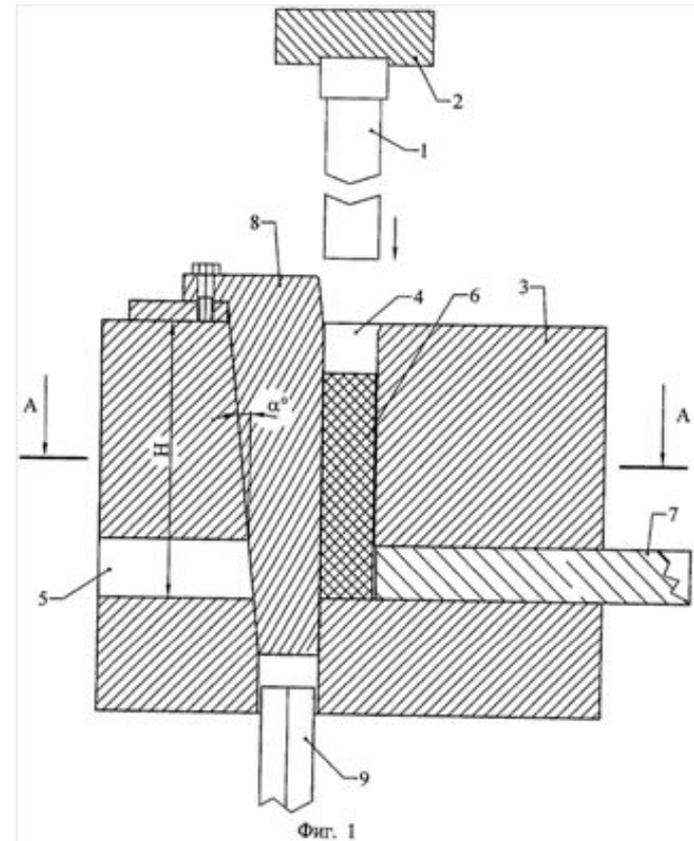
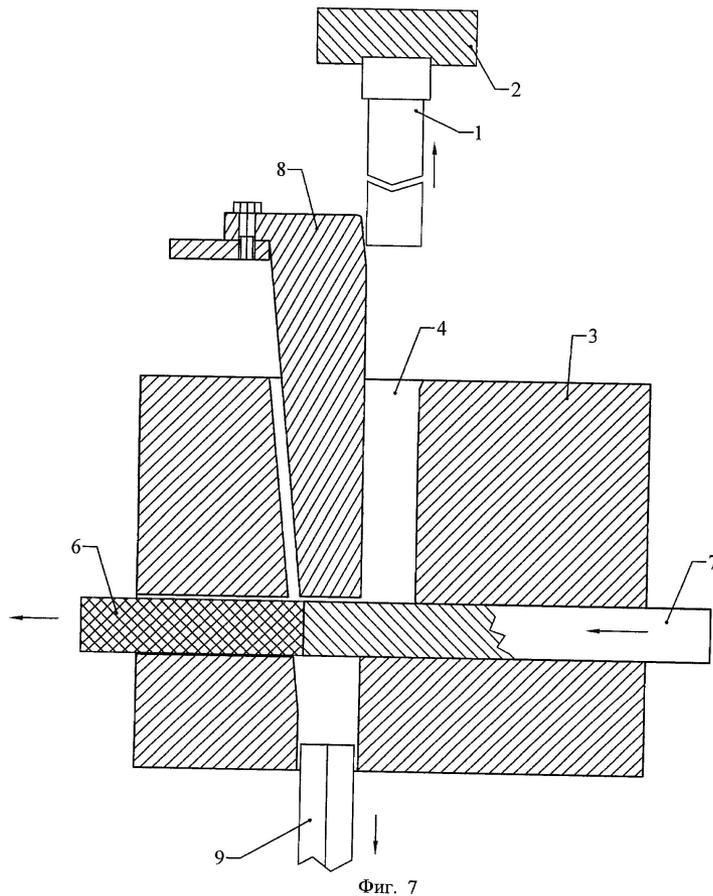


Фиг. 5



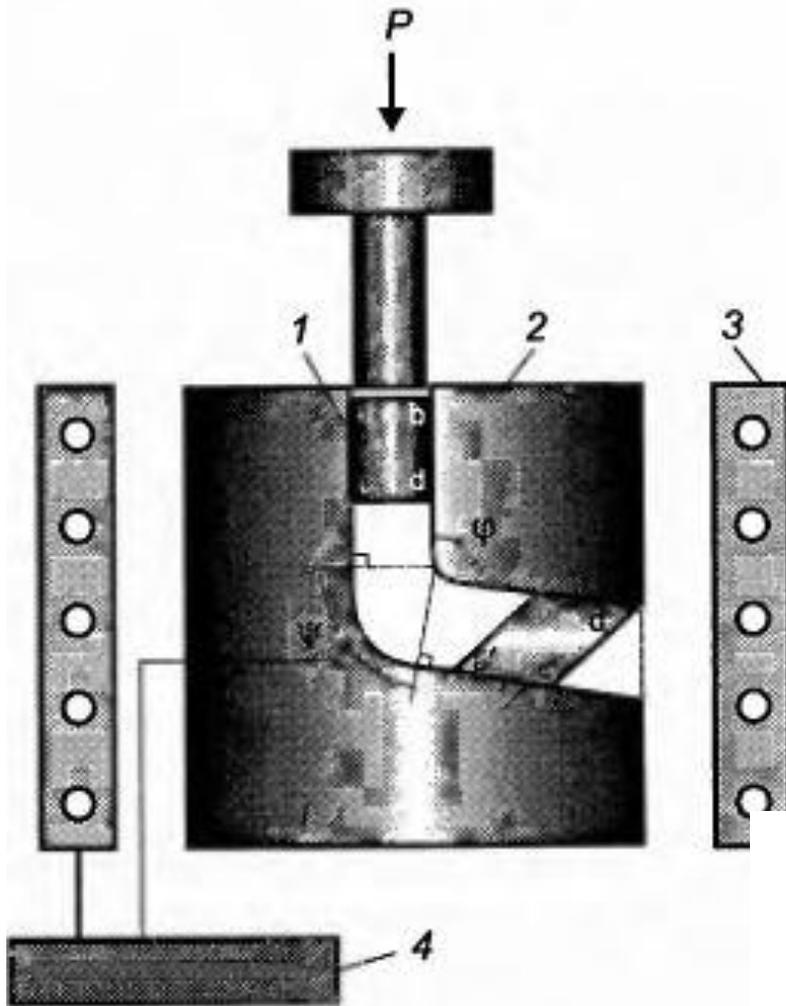
Фиг. 6

*** Конструкция установки для РКУП
с подвижной стенкой
(сложность используемого оборудования!!!)**



Компактирование порошков методом РКУП

(возможность получения сплава со 100 % плотностью без трещинообразования)



- Пример: РКУП Al порошка
Угол пересечения каналов $\varphi = 105^\circ$;
- Внешний изгиб дуги составил угол $\psi = 75^\circ$;
 - РКУП осуществляется в трубке;
 - Температура обработки $T = 300^\circ\text{C}$;

Установка для РКУ прессования Al порошков [69]:

1 – заготовка; *2* – оснастка; *3* – электропечь; *4* – термометр; *a-b-c-d* и *a'-b'-c'-d'* – геометрические параметры заготовки

Всесторонняя ковка

Всесторонняя ковка - перспективная схема ИПД, заключающаяся в изотермической деформации заготовок при последовательном проведении операций осадки (со степенью деформации 40 - 60 %) и протяжки на исходный размер со сменой оси приложения деформирующего усилия

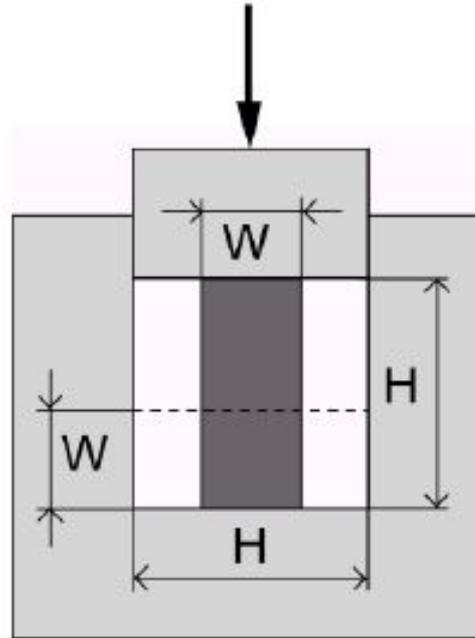


$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{H}{W} \right) \quad (3),$$

где H и W высота и ширина заготовки, соответственно.

*Закрытая ковка

(аналог всестороннейковки)



$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{H}{W} \right) \quad (3),$$

где H и W высота и ширина заготовки, соответственно.

Всесторонняя и закрытая ковки

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

1. Изотермический процесс .
2. Высокие степени суммарной деформации (порядка 1000 %);
3. Широкий диапазон рабочих температур ($T = 20-950$ °C), обеспечиваемый за счет использования индукционно-нагреваемых плоских бойков из жаропрочного никелевого сплава.
4. Цилиндрические или призматические заготовки.

ДОСТОИНСТВА

1. Эффективное измельчение структурных составляющих материала вплоть до $d \sim 10-100$ нм). Размер структурных составляющих принципиально ограничивается только мощностью используемого оборудования;
2. Простота и отсутствие необходимости использования специального дорогостоящего инструмента;
3. Возможность внести в материал значительную энергию на единицу массы – намного больше, чем при использовании методов РКУП и ИПДК.
4. Возможность получать УМЗ структуру хрупких и высокопрочных материалов.

НЕДОСТАТКИ

1. Ограничение однократной степени деформации из-за потери устойчивости заготовки при осадке.
2. Зональная неоднородность деформации заготовки при осадке, приводящая к неоднородности структуры.
3. Ограниченный размер заготовок..
4. Дискретность и низкая технологичность процесса.
5. По сравнению с процессами РКУП или ИПДК однородность деформации значительно ниже.



а



б



в



г



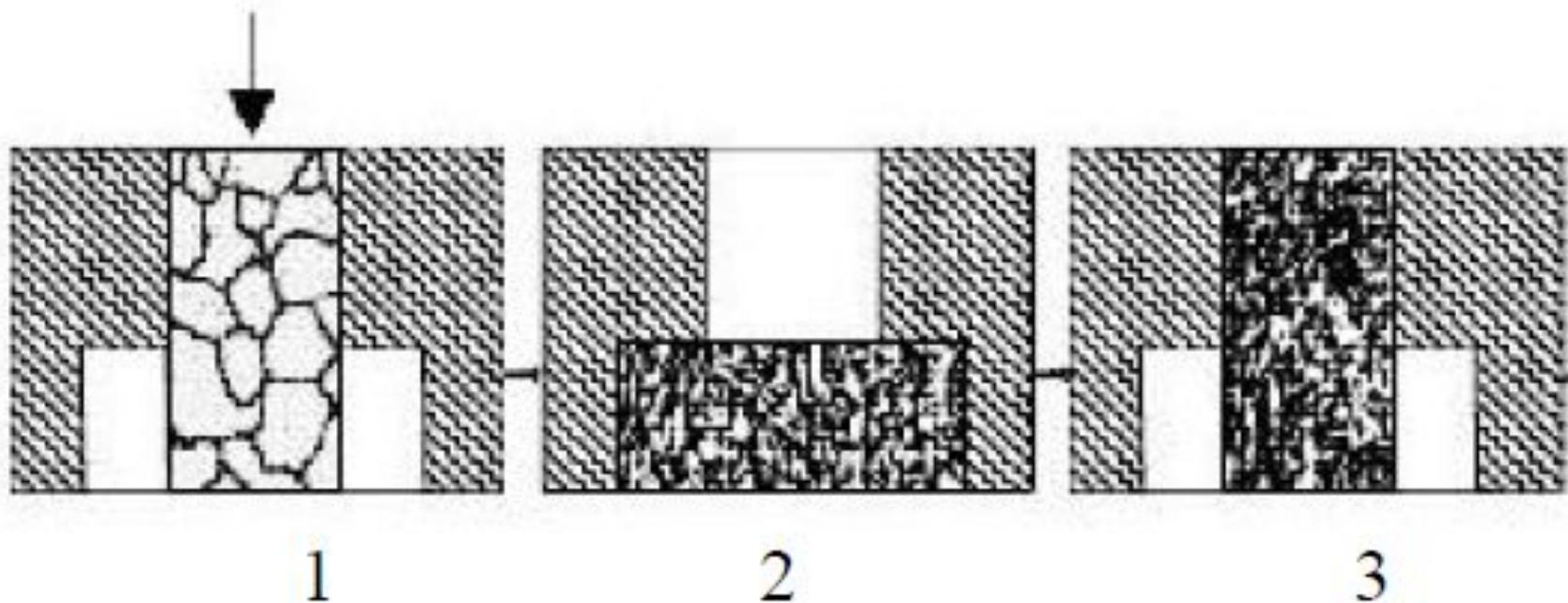
д



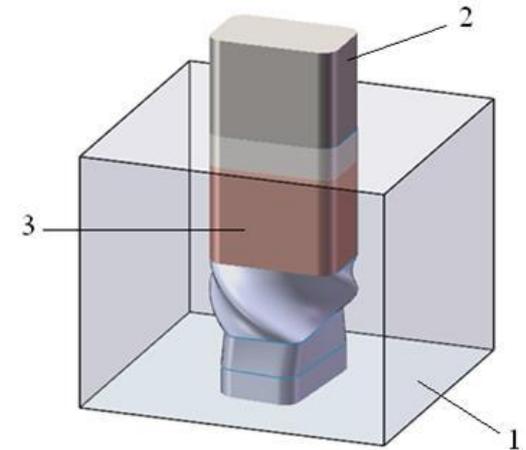
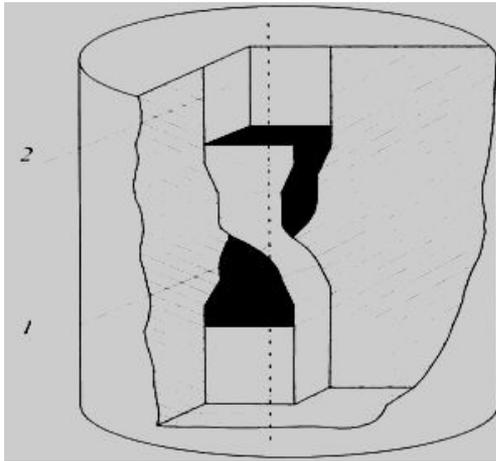
е

- Рисунок - Объемные титановые наноструктурные полуфабрикаты: а - пруток $\varnothing=200$ мм, $L=300$ мм; б - пруток $\varnothing=80$ мм, $L=350$ мм; в - шайба $\varnothing=320$ мм, $h=100$ мм; г - кольцо $\varnothing_{\text{внеш}}=320$ мм, $\varnothing_{\text{внутр}}=200$ мм, высота $h=80$ мм; д - сляб под прокатку $200 \times 170 \times 100$ мм³; е - слябы под прокатку $160 \times 100 \times 60$ мм³.

Многократное одноосное прессование



ВИНТОВАЯ ЭКСТРУЗИЯ



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

1. Совмещение процесса экструзии и схемы ИПДК.
2. Многоцикловая обработка.

РАЗМЕР И ФОРМА ЗАГОТОВОК

Объемные заготовки круглого или квадратного сечения.

ДОСТОИНСТВА

1. Измельчение структурных составляющих материала.
2. В процессе деформации объем и геометрические размеры исходных образцов сохраняются.

НЕДОСТАТКИ

1. Ограниченный размер УМЗ заготовок.
2. Дискретность и низкая технологичность процесса.

Свойства титана после винтовой экструзии

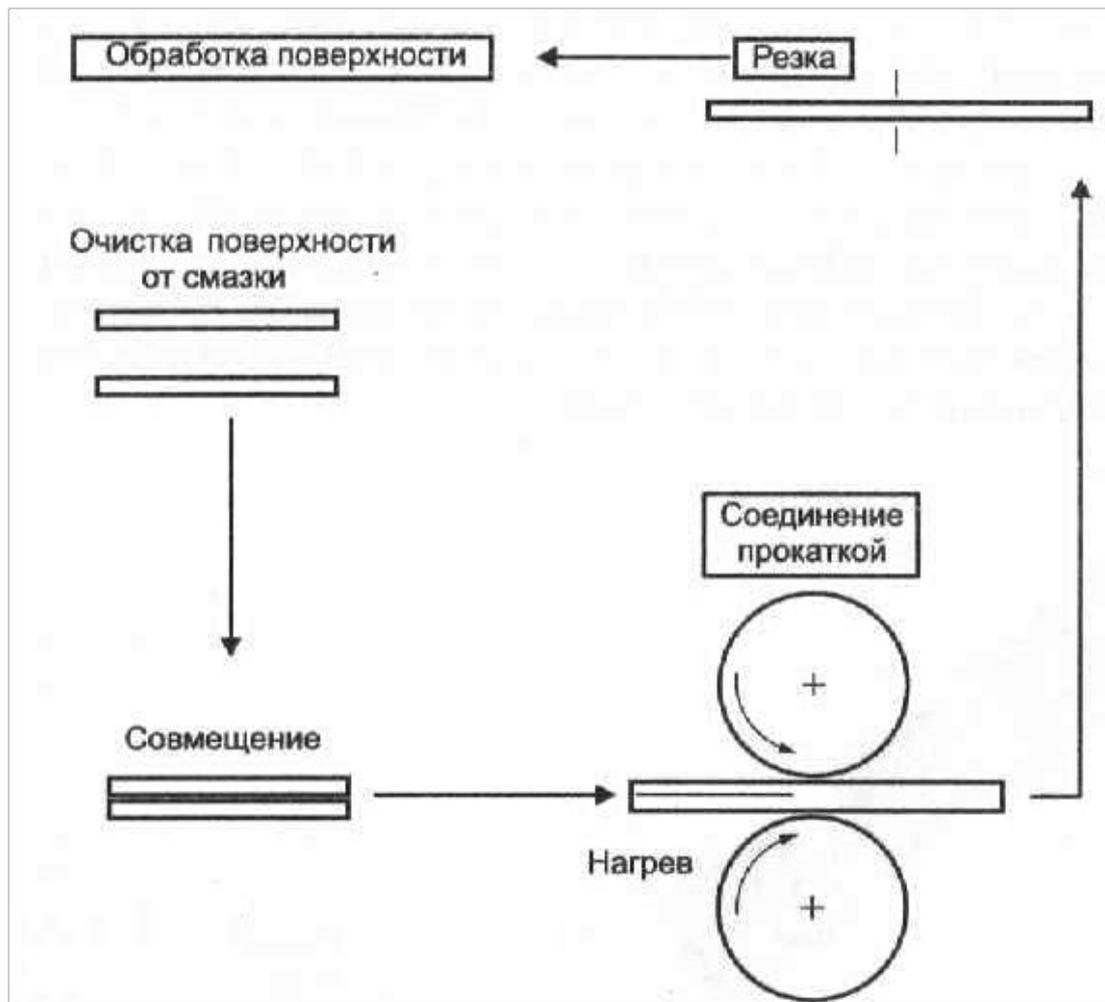
Таблица 1. Механические свойства Ti после винтовой экструзии (ВЭ) и последующего отжига или холодной прокатки

Состояние	Направление испытаний к оси экструзии	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	H_V , МПа
Состояние поставки	Продольное	505	375	36	1800
	Поперечное	500	360	46	1850
ВЭ (3 прохода)	Продольное	505	463	31	2300
	Поперечное	835	765	17	2800* 2400**
ВЭ (3 прохода) + отжиг 300 °С, 1 ч	Продольное	500	441	37,5	—
	Поперечное	865	737	37,5	—
ВЭ (3 прохода) + ХП (50%)	Продольное	780	750	30	2700
	Поперечное	795	760	27	2750* 3300**

* — торец пластины.

** — плоскость пластины.

Процесс накапливаемого соединения прокаткой



$$D_{\text{кон}} = 50\% D_{\text{нач}}$$

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УМЗ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ



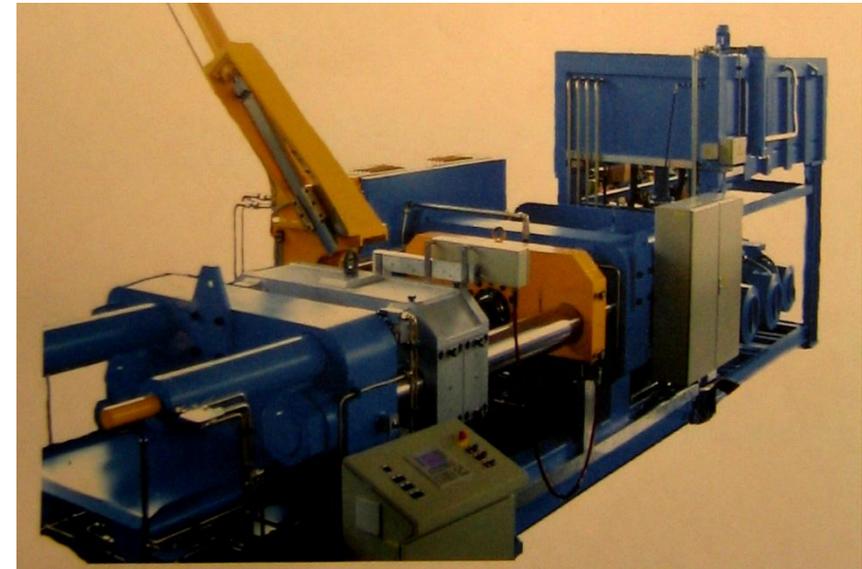
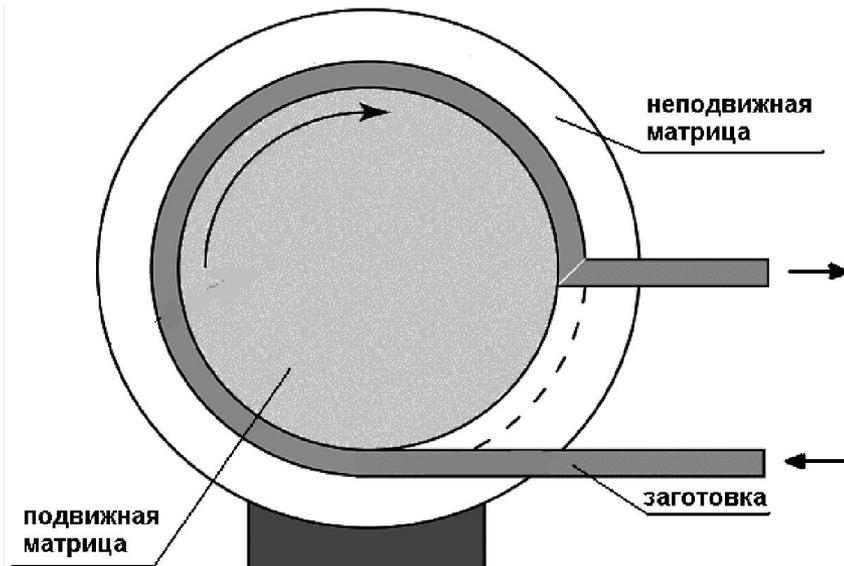
Перспективы
инновационного
применения проволоки из
УМЗ низкоуглеродистой и
среднеуглеродистой
стали



РАЗВИТИЕ СПОСОБОВ ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ

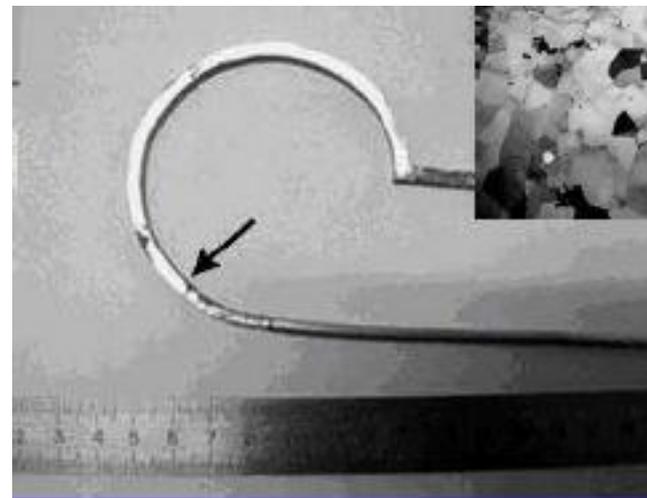
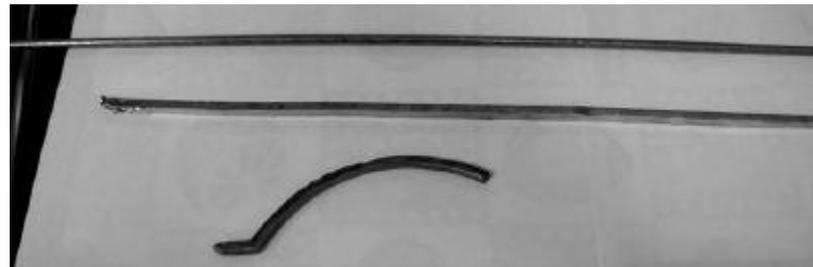
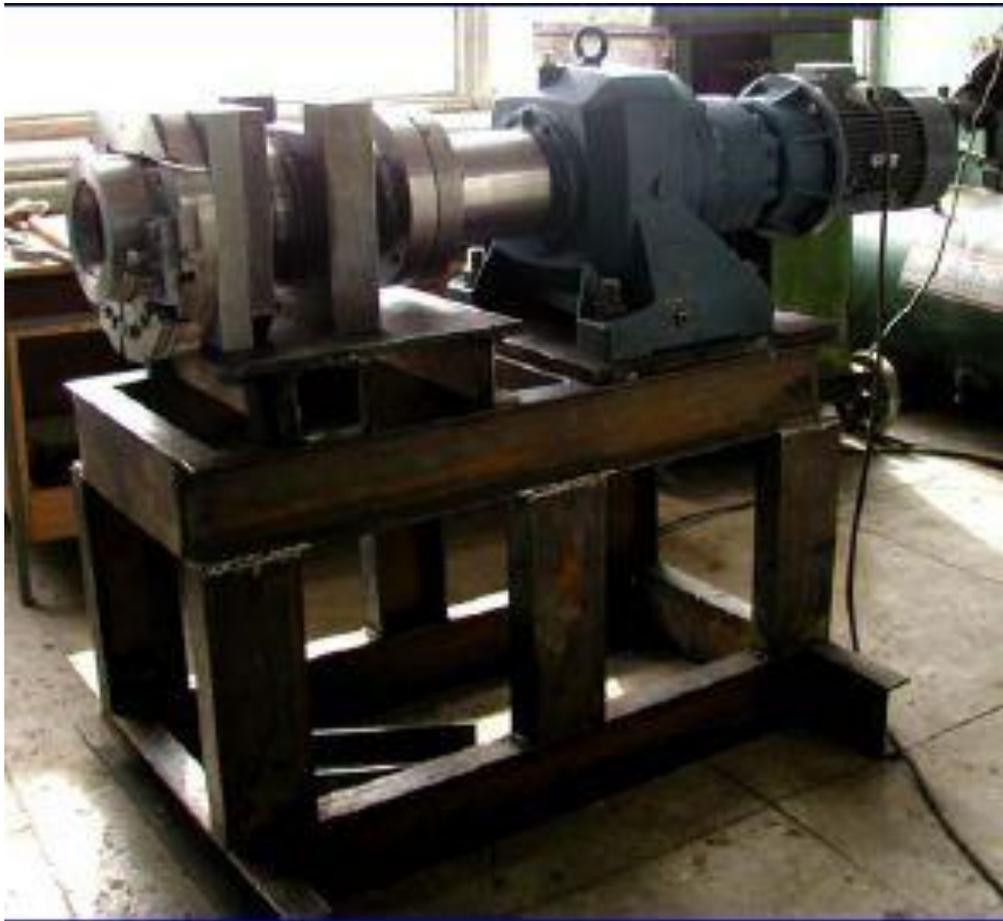


РКУ - «конформ» прессование



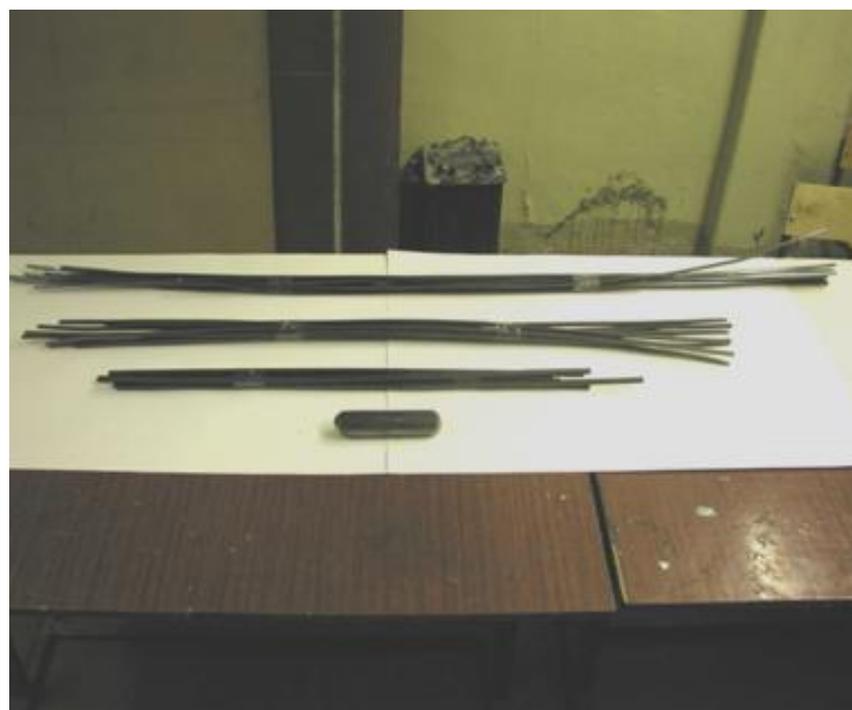
Технологические особенности процесса	Форма и размеры заготовок	Преимущества	Технологические ограничения
<p>1. Угол пересечения каналов инструмента: 90 град. 2. Многоцикловая обработка. 3. Деформация в холодном состоянии или при повышенных температурах.</p>	<p>Объемные заготовки круглого или квадратного сечения.</p>	<p>1. Деформация простым сдвигом и формирование однородной УМЗ структуры. 2. Объем и геометрические размеры исходных образцов сохраняются. 3. Непрерывность процесса.</p>	<p>1. Сложное оборудование, специально разрабатываемое с учетом геометрических размеров обрабатываемых заготовок. 2. Геометрия инструмента не позволяет обрабатывать заготовку по схеме «круг→круг».</p>

РКУ- «конформ» прессование

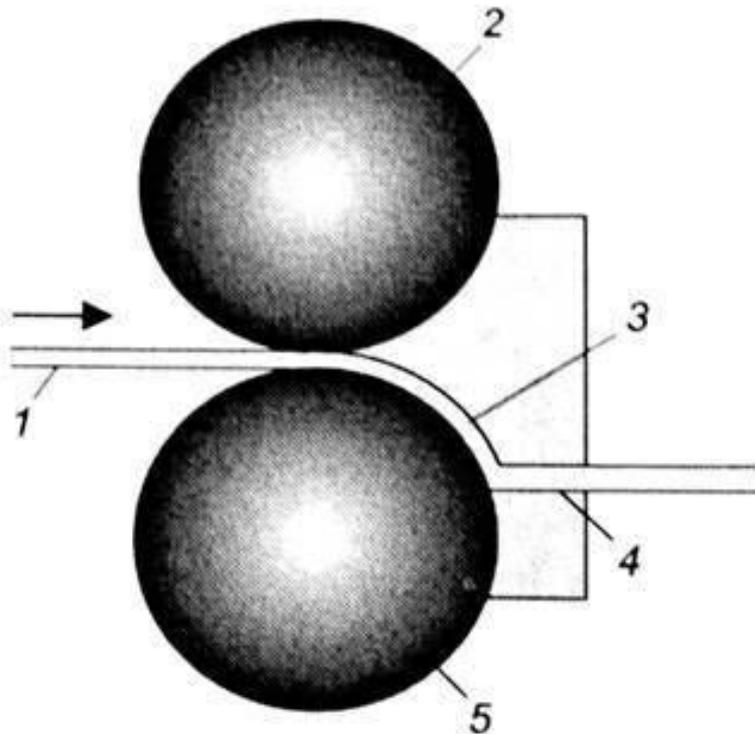


Прочностные свойства наноструктурного Ti Grade4, полученного с помощью РКУП-С, и других титановых материалов, применяемых для медицинских имплантатов1

Механические свойства	Титан ВТ 1-0**	Сплав ВТ-6,	Ti-6Al-4V ELI*	Grade 4*	Нано-Grade 4,
Предел прочности σ_b , МПа	200-400	850-1000**	940	780	1250-1300
Предел текучести, $\sigma_{0.2}$ МПа	350	750- 900	840	600	1170



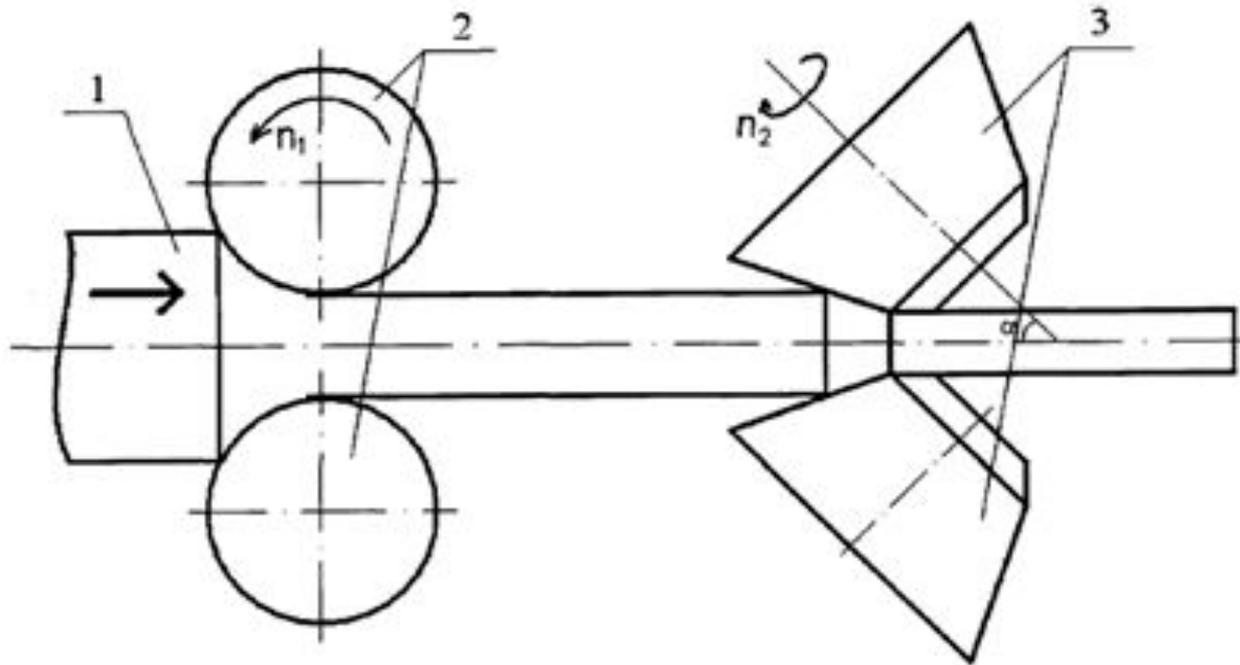
Комбинированная схема РКУП и прокатки



- 1- тонкая полоска;
- 2- направляющий валок;
- 3 - зазор;
- 4 - выходной канал;
- 5 - подающий валок.

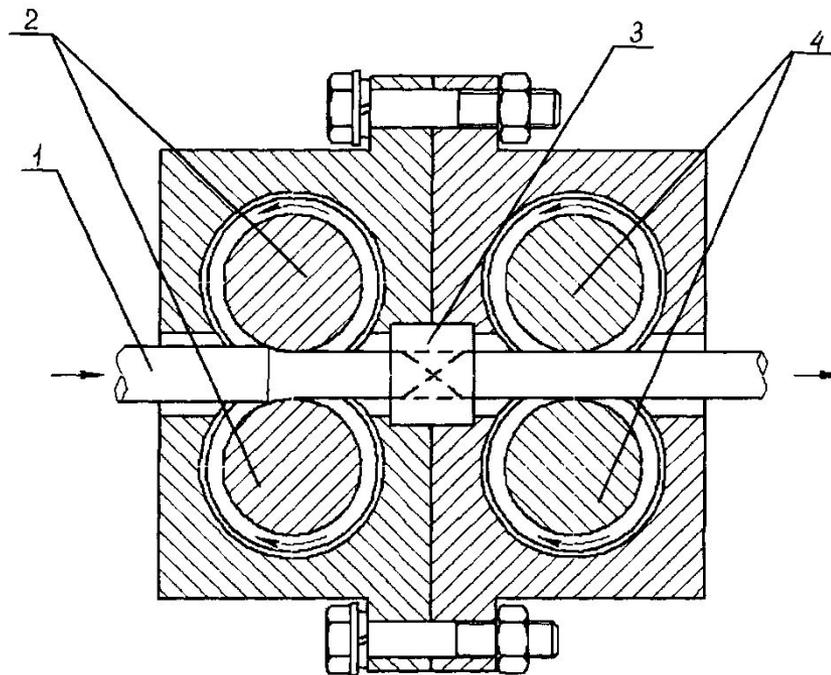
Технологические особенности процесса	Форма и размеры заготовок	Преимущества	Технологические ограничения
Многоцикловая обработка.	Тонкая металлическая полоса (толщина 1,5 мм).	Непрерывность процесса	Существенная неоднородность сформированной структуры и свойств материала.

Совмещенный способ продольной прокатки с последующей поперечно-винтовой прокаткой длинномерных изделий



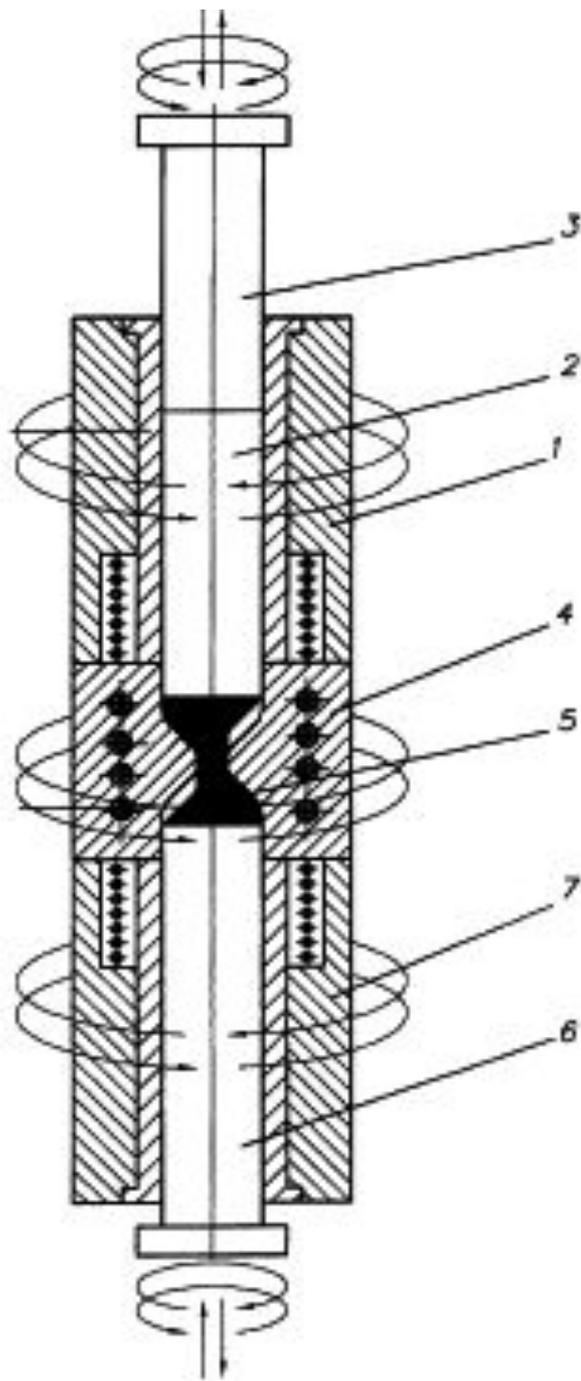
- 1 - заготовка,
- 2 - валки продольной прокатки,
- 3 - валки поперечно-винтовой прокатки

Способ ИПД включающий продольную прокатку, кручение и формообразование заготовки в формообразующих валках



Заготовка 1 прокатывается подающими валками 2, где получает деформацию в продольном направлении, затем поступает в матрицу с винтовым каналом 3, где осуществляется деформация кручением

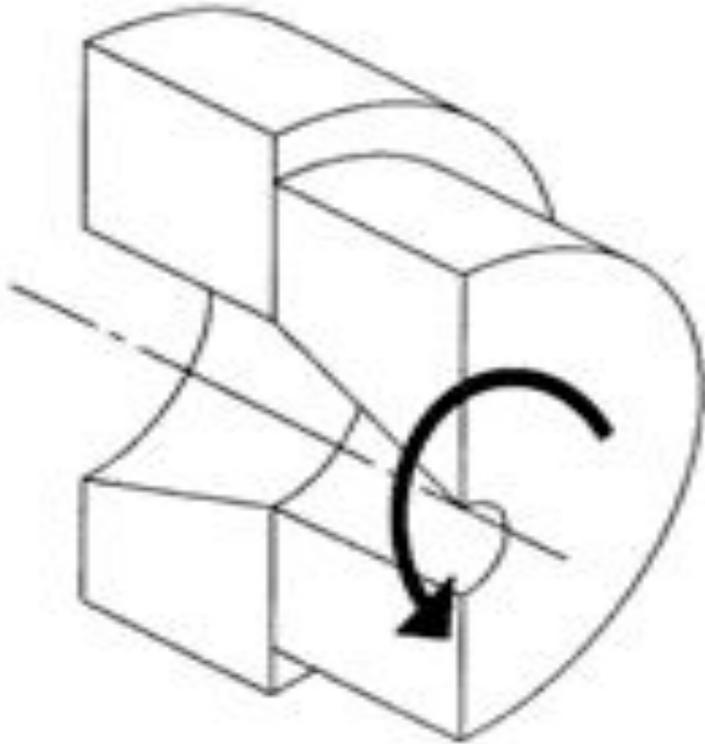
ИПД длинномерных заготовок, осуществляемый за счет вращения инструмента



Верхний и нижний контейнеры, а также профилирующий инструмент имеют возможность вращения относительно друг друга в разных направлениях, нагрева и (или) охлаждения в различных сочетаниях.

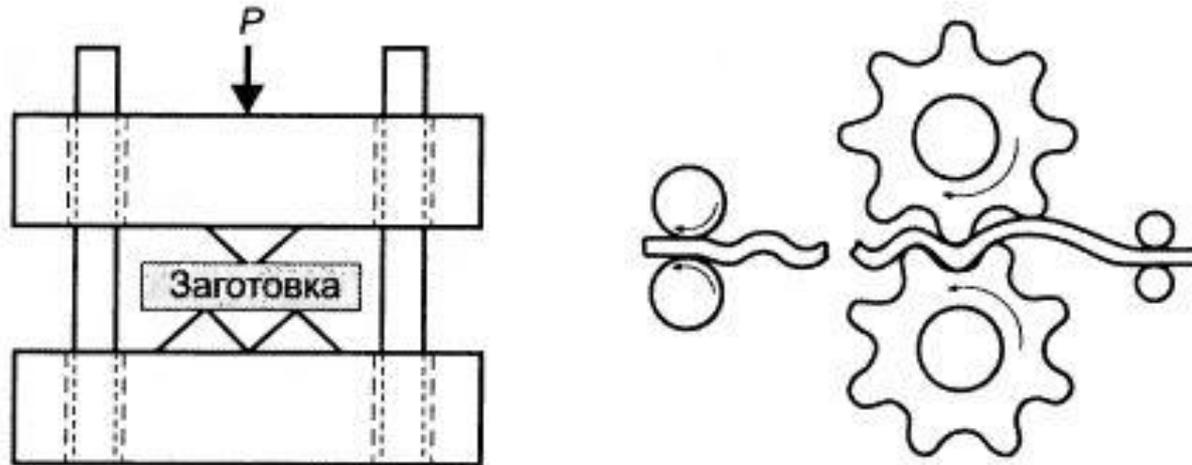
Инструмент состоит из верхнего контейнера 1 с помещенной в него заготовкой 2, которая

ИПД волочением со сдвигом



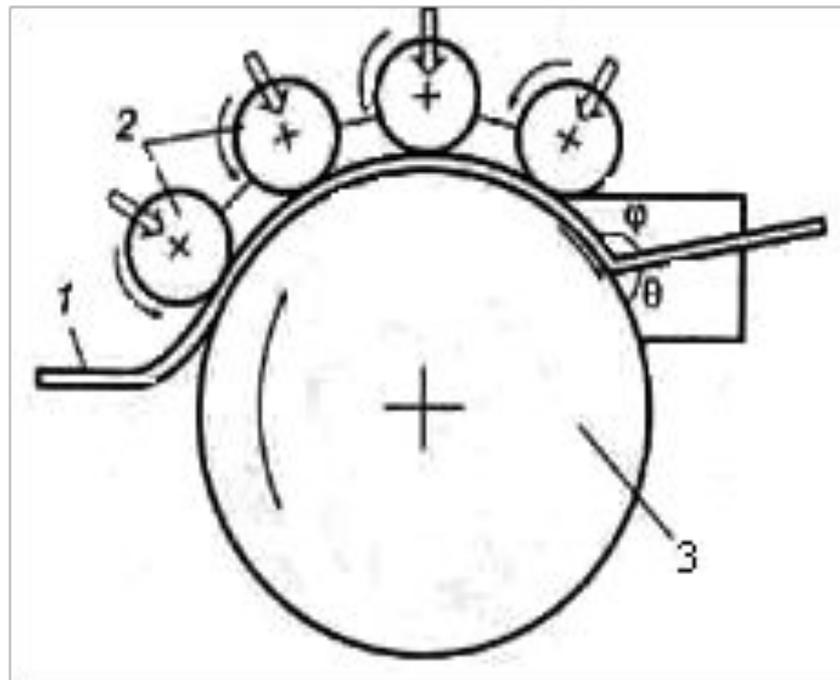
Деформация металла осуществляется за счет приложения тянущей силы через две последовательно расположенные конические волокни с одновременным вращением одной из волок

Способ многократного изгиба и выпрямления полосы



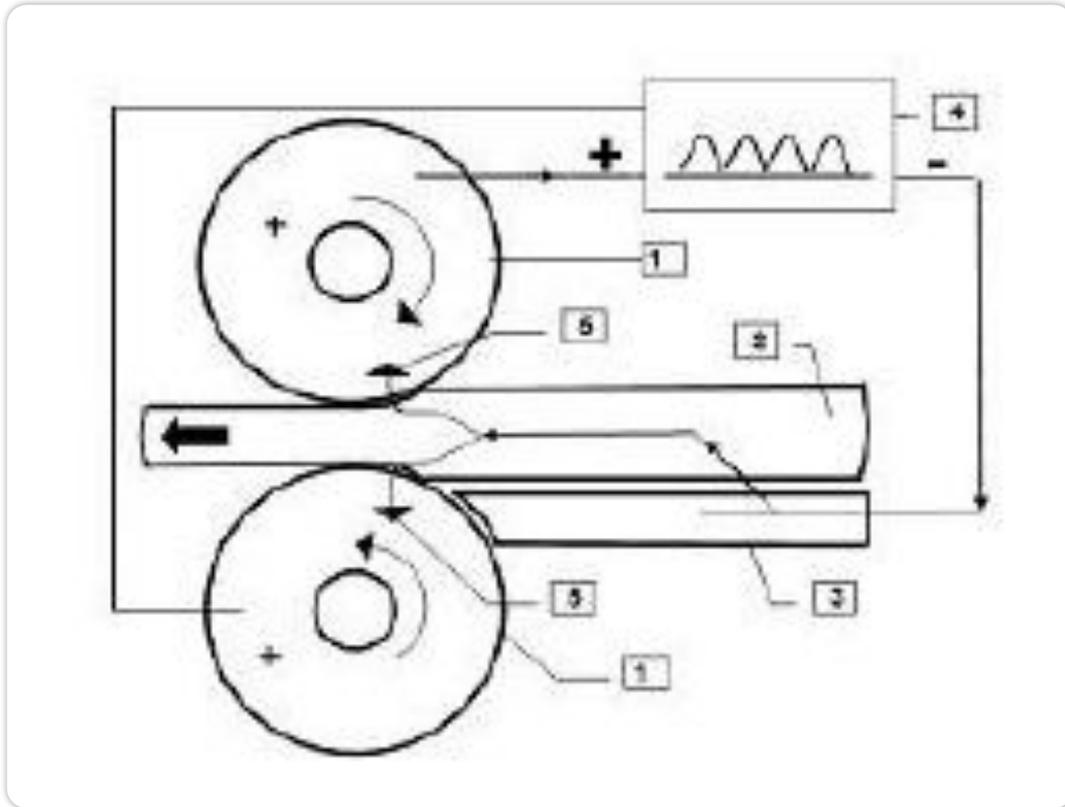
- Существенное измельчение структуры
(медь: размер зерен до обработки 760 мкм, после - 500 нм);
- Высокая неоднородность структуры.

Принципиальная схема реализации conshearing-процесса



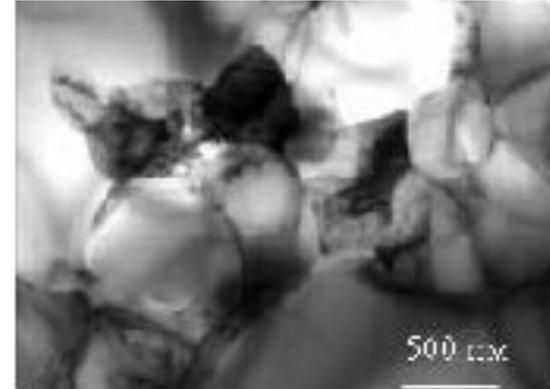
- 1 - стальная полоса;
- 2 - вращающийся центральный валок;
- 3 – вращающиеся вспомогательные валками.

Электропластическая деформация. Электропластическая прокатка (ЭПП)

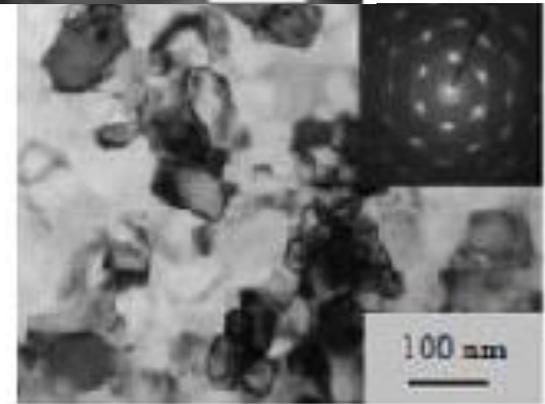


Принципиальная схема ЭПП

- 1 – плоские валки
или ручьевые калибры;
- 2- образец;
- 3 – подающий стол;
- 4 – генератор импульсного тока;
- 5 – направление тока



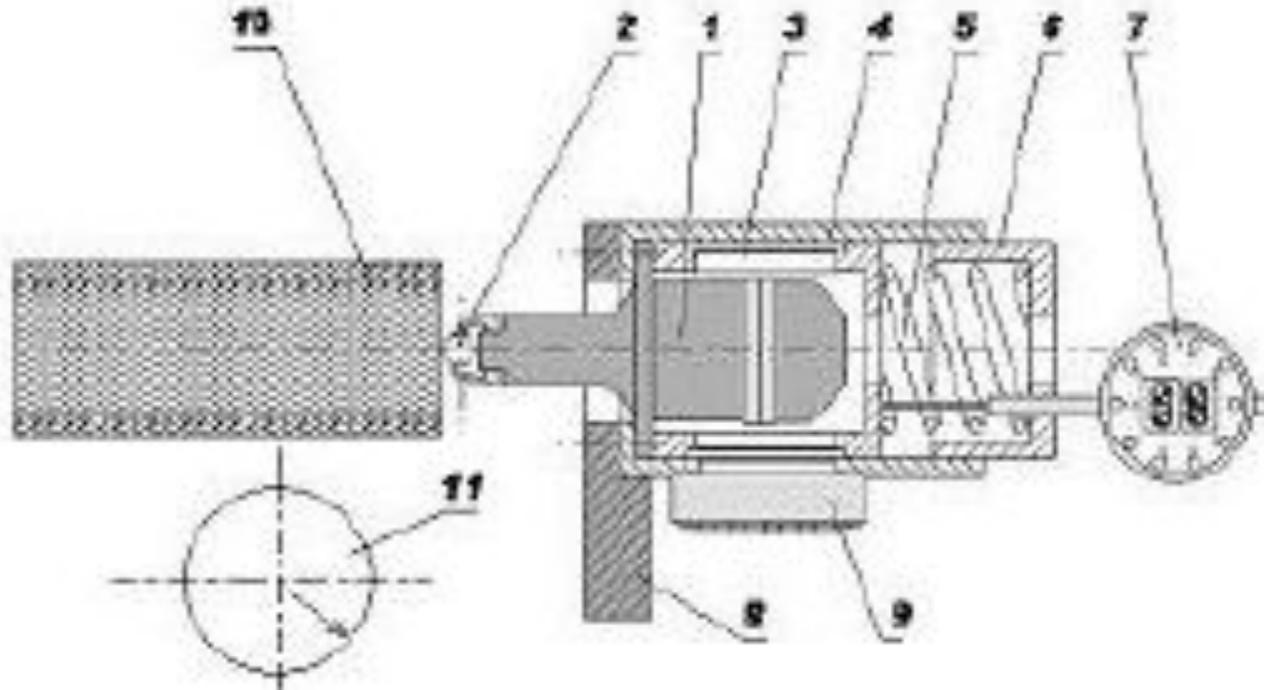
б



в

б, в – микроструктура
сплавов VT6 и TiNi
после ЭПП

Ультразвуковая поверхностная обработка



Установка УЗВУ:

1. Ультразвуковой излучатель (УЗИ);
2. Индентор для выглаживания - шар диаметром 5 –10 мм;
3. Втулка; 4. Корпус устройства; 5. Пружина; 6. Резьбовой стакан;
7. Индикатор часового типа; 8. Сменный кронштейн; 9. Вентилятор; 10. Обработкаемая деталь;
11. Вид деформируемой поверхности материала.

КОМПЛЕКС ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ПРОЦЕССУ РАВНОКАНАЛЬНОЙ УГЛОВОЙ СВОБОДНОЙ ПРОТЯЖКИ

Требования к способу

непрерывность, технологическая стабильность и высокая производительность

сохранение исходных геометрических размеров проволоки

сохранение исходного химического состава материала

достижение необходимого уровня и равномерности НДС проволоки

возможность интеграции в процессы волочения

высокая интенсивность и немонотонность деформации, обеспечивающие формирование УМЗ структуры материала

возможность изменения технологических параметров процесса обработки

широкая номенклатура геометрических размеров проволоки

отсутствие дополнительной химико-термической обработки

рациональное использование энергоресурсов, материалов и оборудования

Требования к продукции

соответствие физико-механических свойств требованиям НТД

соответствие геометрических параметров требованиям НТД

эксплуатационная надежность и долговечность

конкурентоспособности и рентабельность

Требования к инструменту

возможность установки на действующем оборудовании метизной отрасли

относительная простота изготовления и обслуживания

унификация конструкции

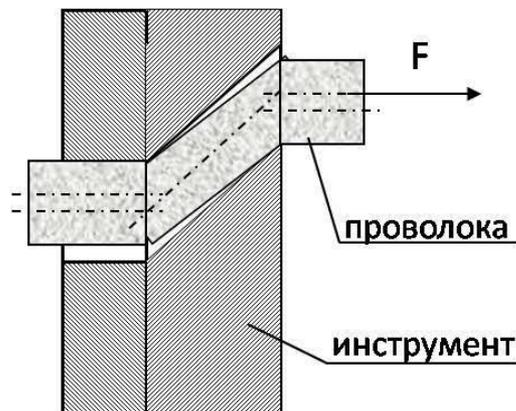
высокие прочность, теплопроводность, износостойкость, коррозионная стойкость и полируемость поверхности



ПРОЦЕСС РАВНОКАНАЛЬНОЙ УГЛОВОЙ СВОБОДНОЙ ПРОТЯЖКИ ПРОВОЛОКИ (РКУ протяжка)

разработка коллектива авторов ГОУ ВПО «МГТУ»

Принципиальная схема процесса



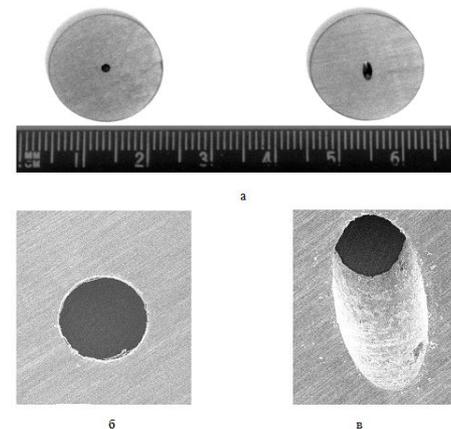
Общий вид

*инструмент для деформационного наноструктурирования
стальной проволоки среднего диаметра*

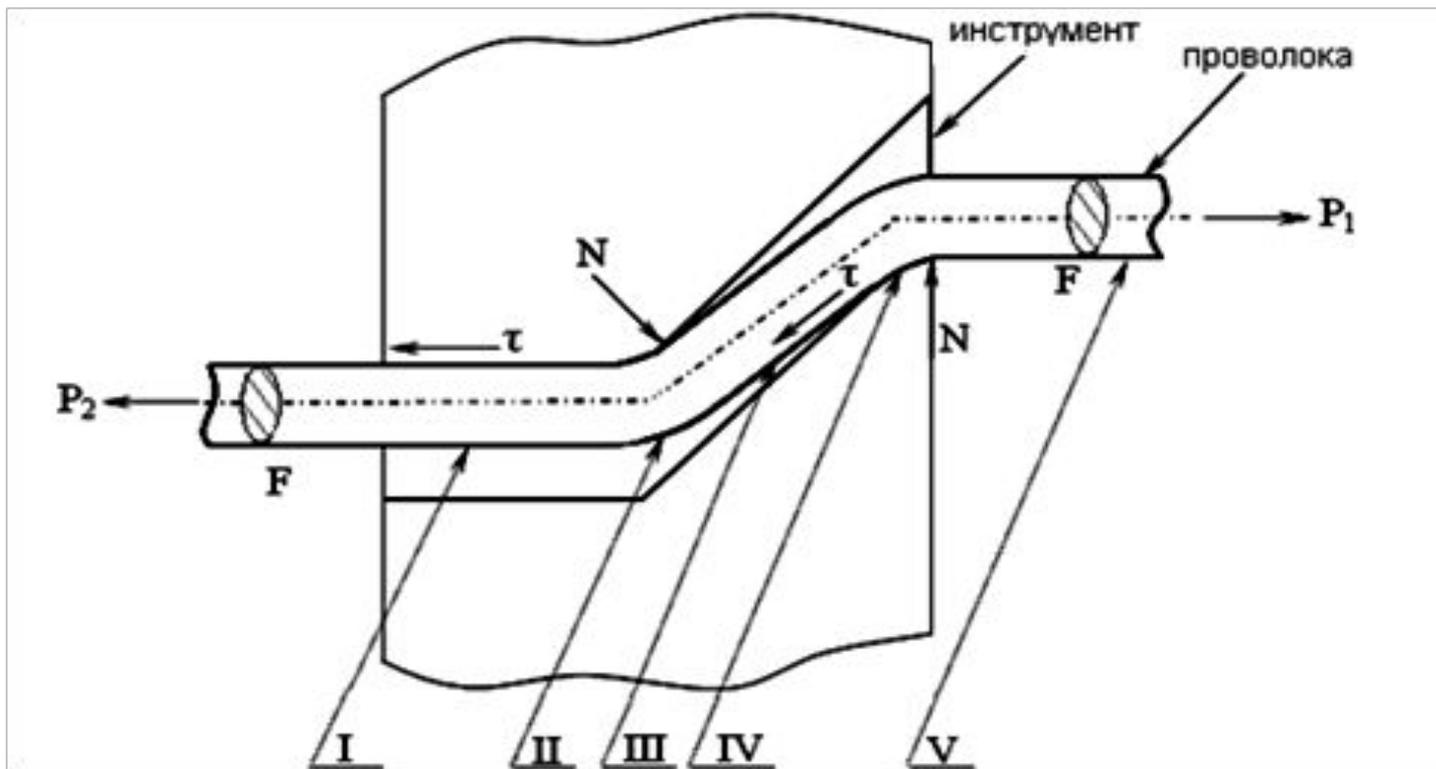


Общий вид вкладышей

*инструмент для деформационного наноструктурирования
биметаллической сталемедной проволоки диаметром 1,0 мм*

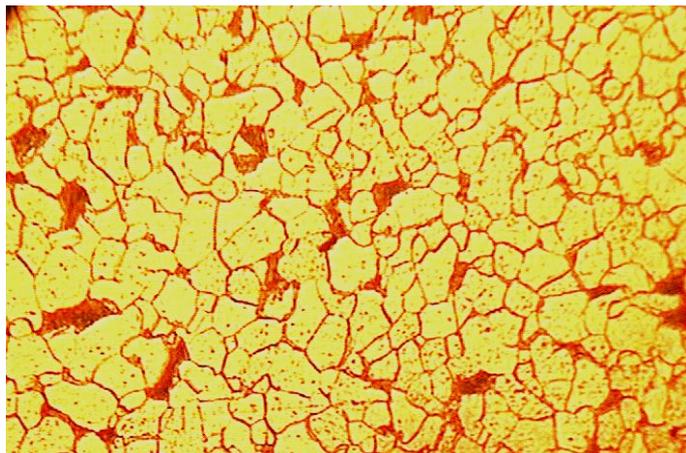


**Принципиальная схема процесса
равноканальной угловой свободной протяжки
(РКУ протяжка)**

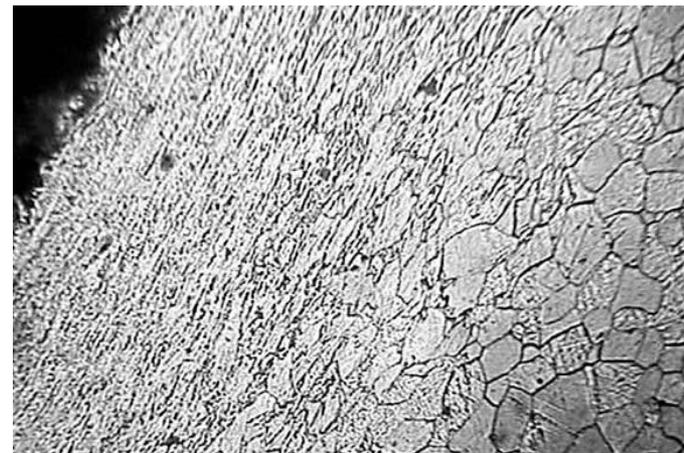


- I - зона свободного входа проволоки в инструмент;
- II - зона упруго-пластического контакта и изгиба в области пересечения каналов инструмента;
- III - межочаговая область;
- IV - зона упруго-пластического контакта и изгиба проволоки в области выхода из инструмента;
- V - зона свободного выхода проволоки из инструмента.

Металлографические исследования поверхности сердечника из стали марки 10



исходное состояние, x 500



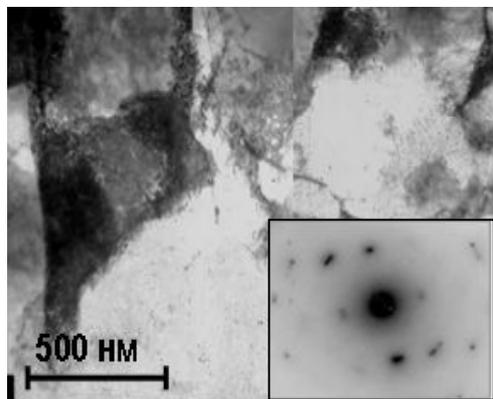
6 циклов РКУ протяжки, x 200

Дифракционный электронно-микроскопический анализ центральной области проволоки

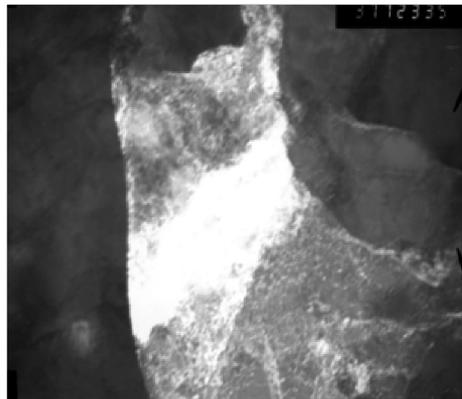
(сталь марки 10; 10 циклов РКУ протяжки; x 30 000)

1. *Фрагментированные зерна феррита (размер фрагментов 300-360 нм)*

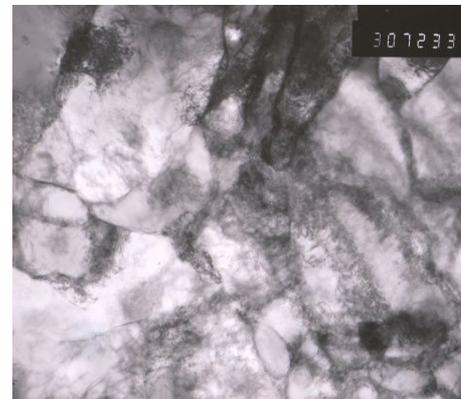
2. *Ультрамелкие зерна феррита с неравновесными границами*



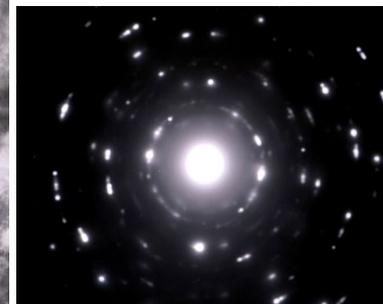
светлопольное изображение



темнопольное изображение



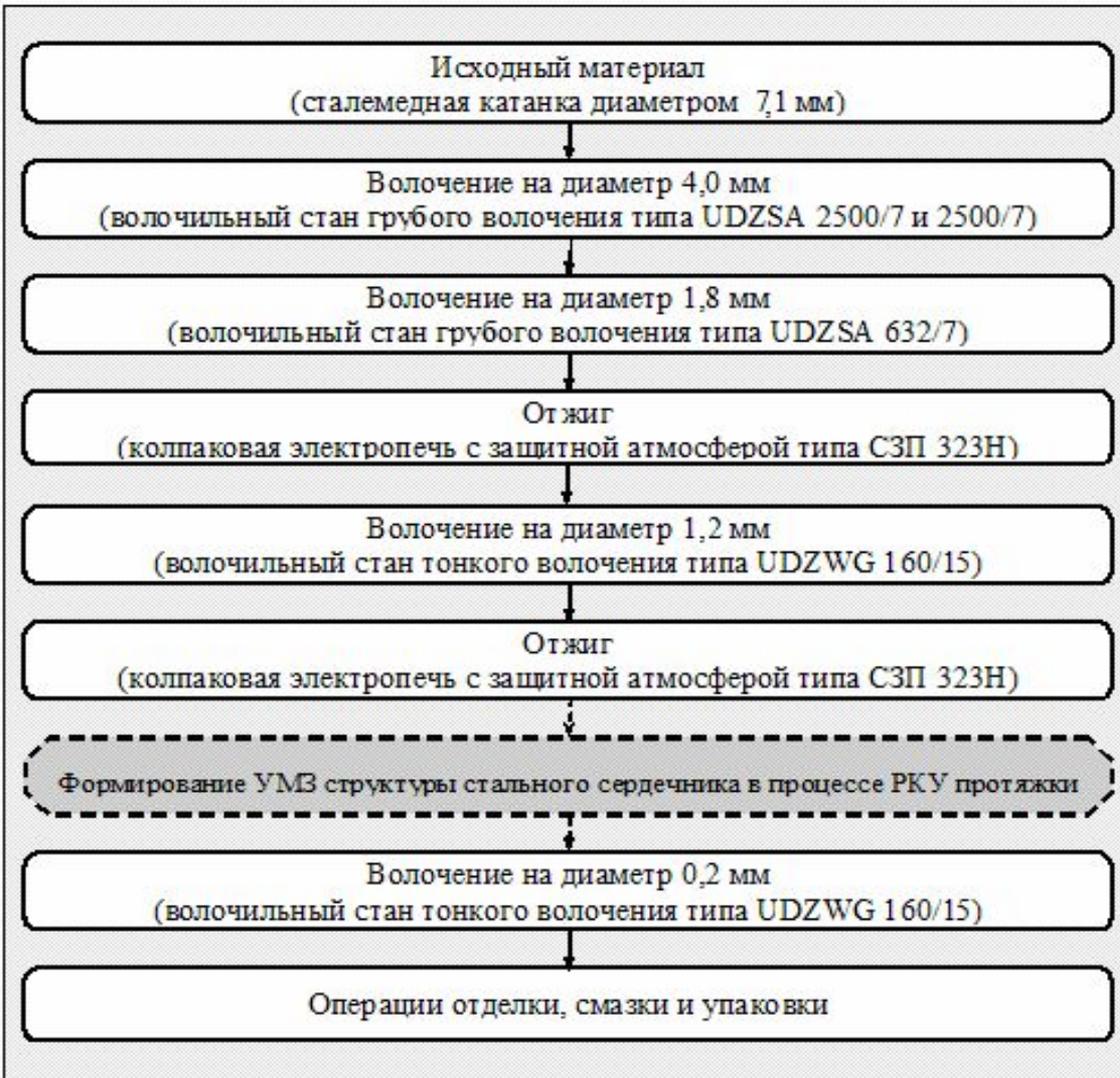
светлопольное изображение



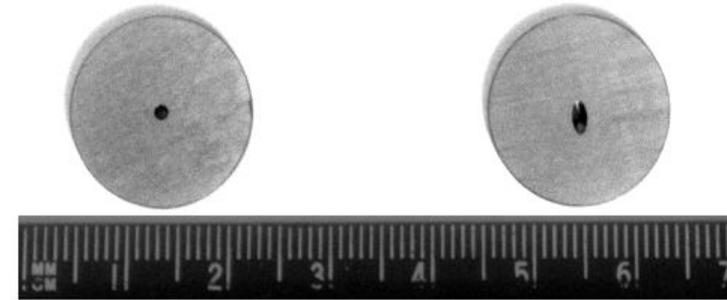
электронограмма

Разработка технологической схемы и инструмента, предназначенных для производства высокопрочной сталемедной проволоки ПБ-0,20 в условиях ООО «ЗМИ-Профит» (г. Магнитогорск)

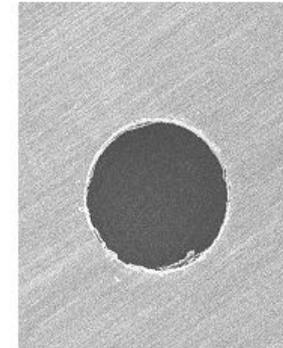
Возможная технологическая схема производства проволоки ПБ-0,20



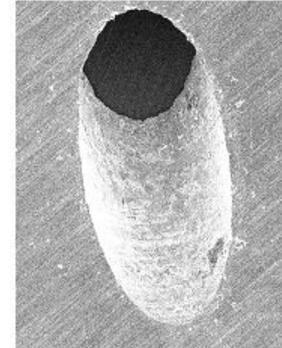
Вкладыши, предназначенные для РКУ протяжки сталемедной проволоки диаметром 1,0 мм



а



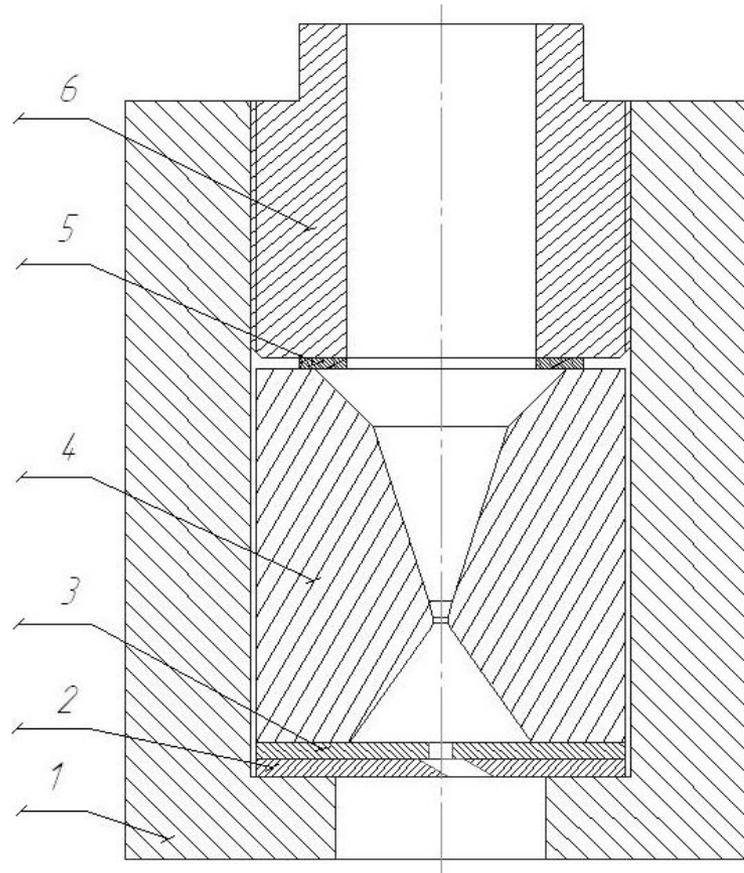
б



в

а - общий вид вкладышей;
б - общий вид горизонтального канала, х 30;
в - общий вид наклонного канала, х 30

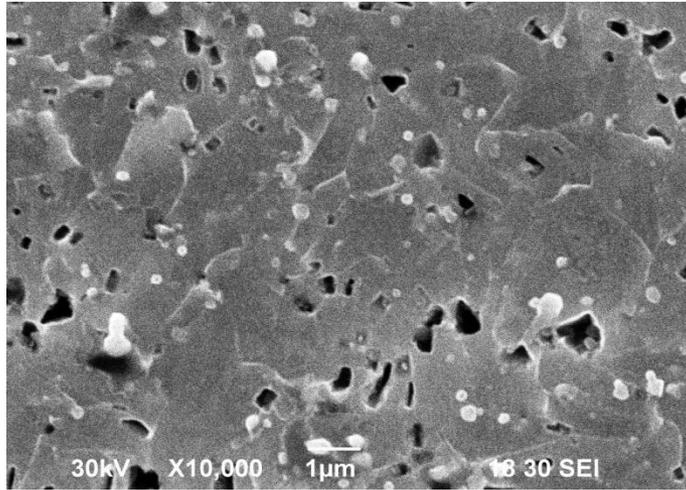
Конструкции технологического инструмента, предназначенного для РКУ протяжки проволоки



- 1-зажимная втулка;
- 2- вкладыш с наклонным каналом;
- 3 - вкладыш с горизонтальным каналом;
- 4- волока с каналом стандартного профиля;
- 5- уплотнительная шайба;
- 6- прижимная втулка.

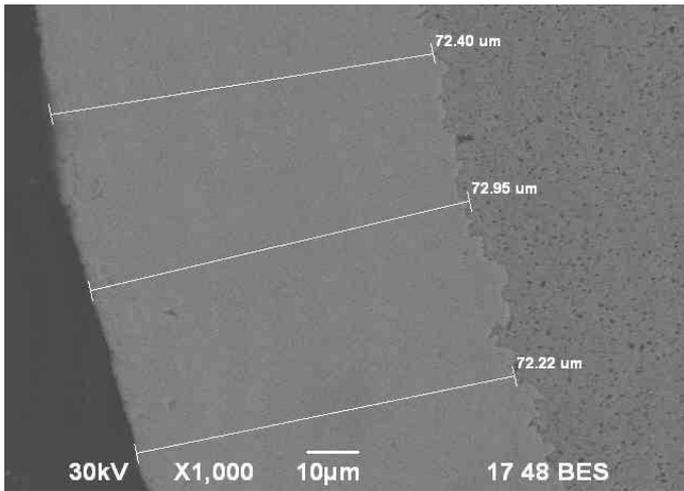
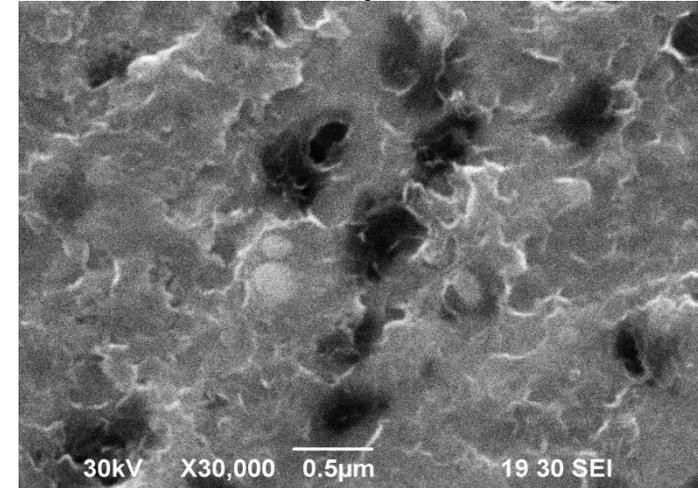
Растровый электронно-микроскопический анализ структуры сталемедной проволоки диаметром 1,0 мм

До РКУ протяжки

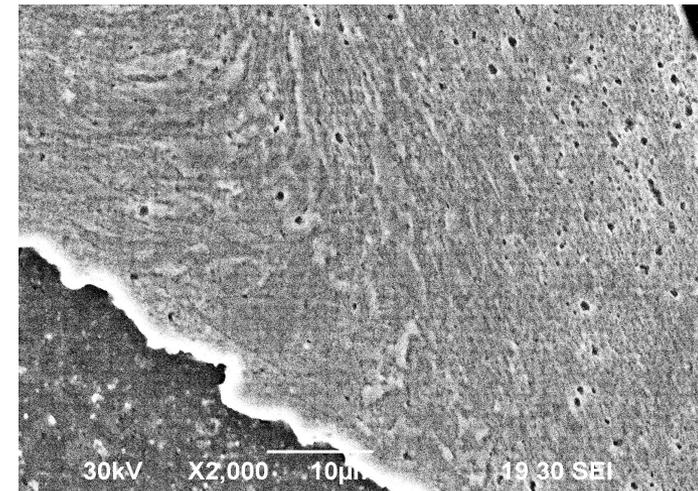


*центральная область
(сталь марки 10)*

После РКУ протяжки



*поверхность
(медная оболочка)*



Количественный анализ изменений, обусловленных РКУ протяжкой

Параметр	Исходное состояние	После РКУ протяжки
Размер зерен феррита, нм	1 000 – 2 500	200 - 430
Размер карбидных частиц, нм	140 - 350	60 - 185
Среднее значение микротвердости в центре, МПа	2090	2870