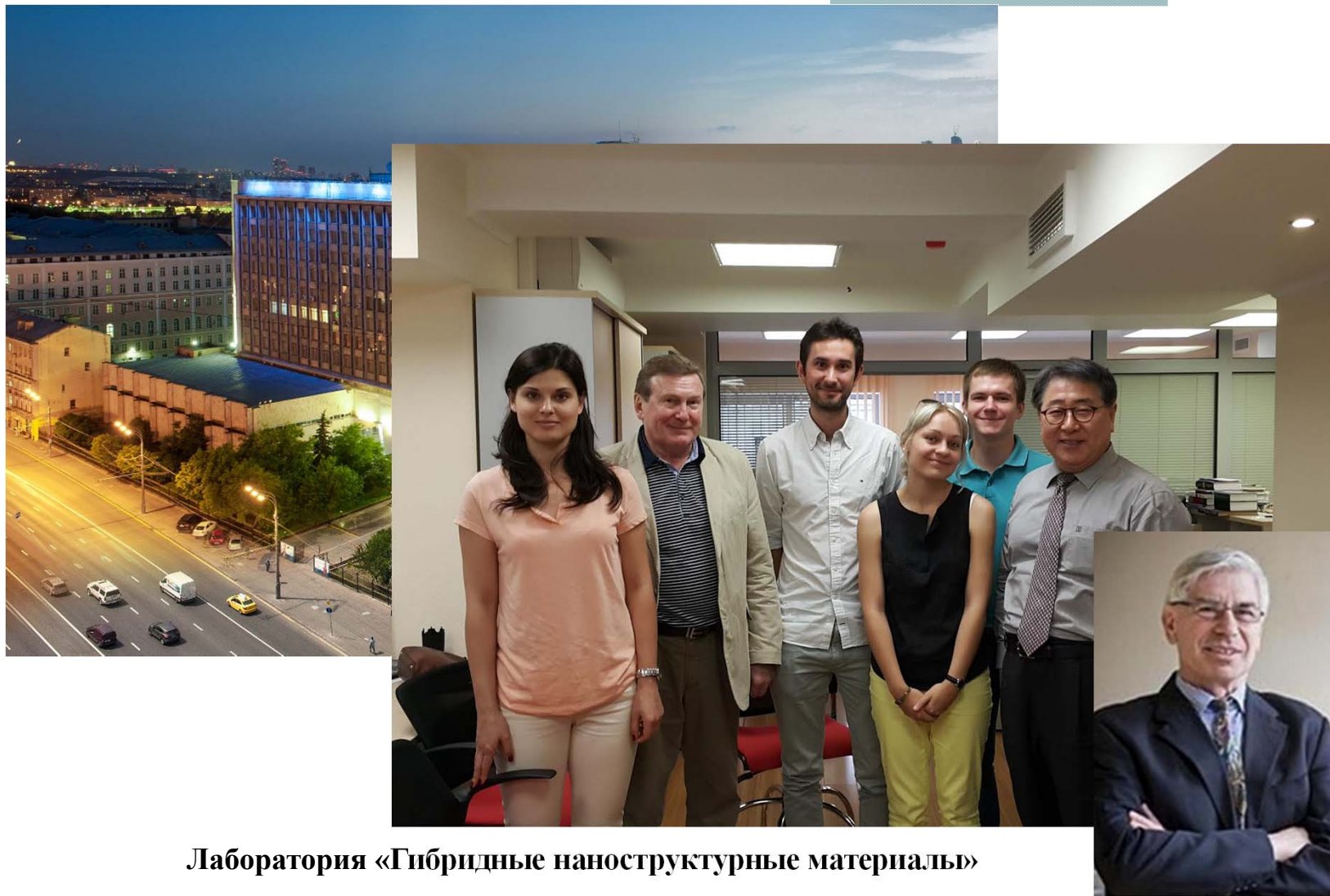




**С.В. Добаткин, Ю.З. Эстрин**

*НИТУ «МИСиС», Лаборатория гибридных наноструктурных материалов*

***Возможности использования  
ультрамелкозернистых легких сплавов в  
авиакосмическом применении***



**Лаборатория «Гибридные наноструктурные материалы»**

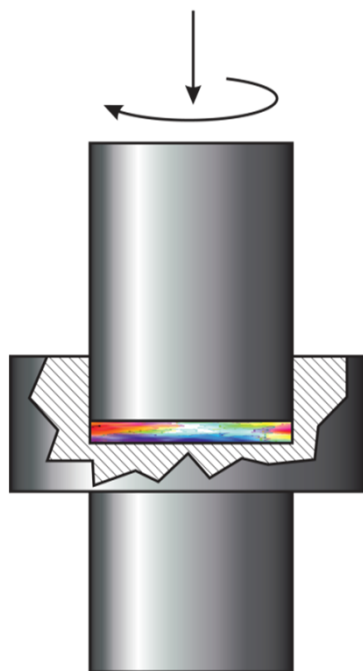


- 1. Введение**
- 2. Особенности структуры ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов, полученных интенсивной пластической деформацией (ИПД).**
- 3. Механические эксплуатационные свойства УМЗ сплавов:**
  - на основе алюминия;**
  - на основе магния;**
  - на основе титана.**
- 5. Возможности использования УМЗ материалов.**
- 6. Заключение.**

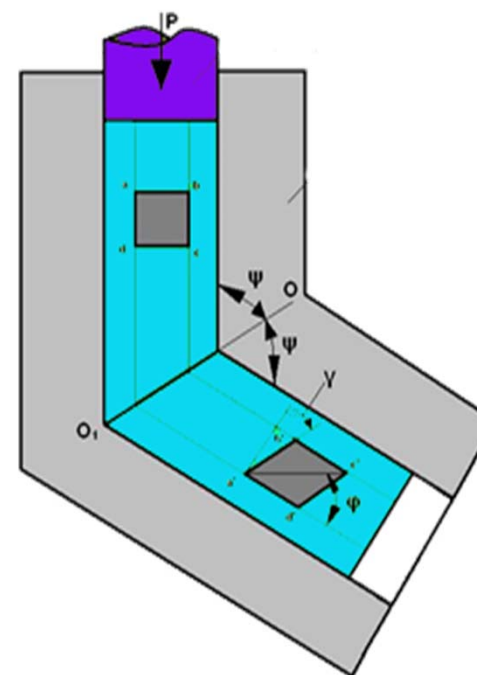
# Методы интенсивной пластической деформации



## Кручение под высоким давлением



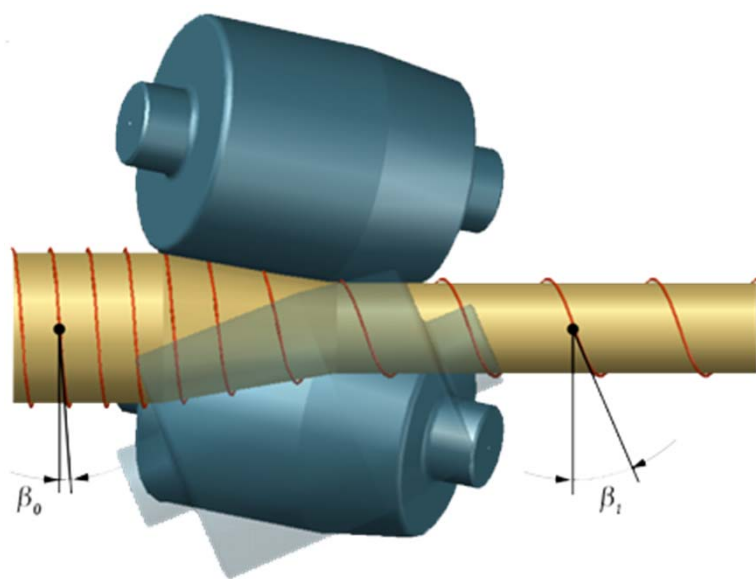
## Равноканальное угловое прессование



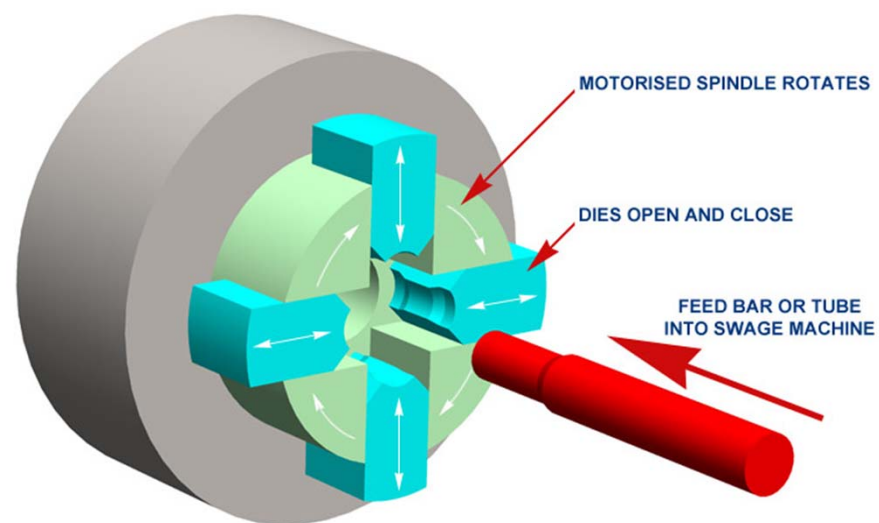
# Индустриальные схемы деформации для измельчения зерна



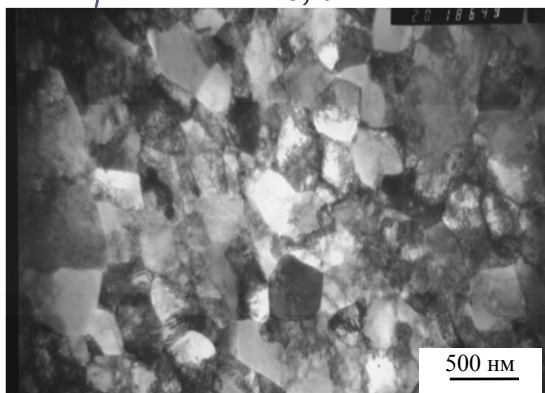
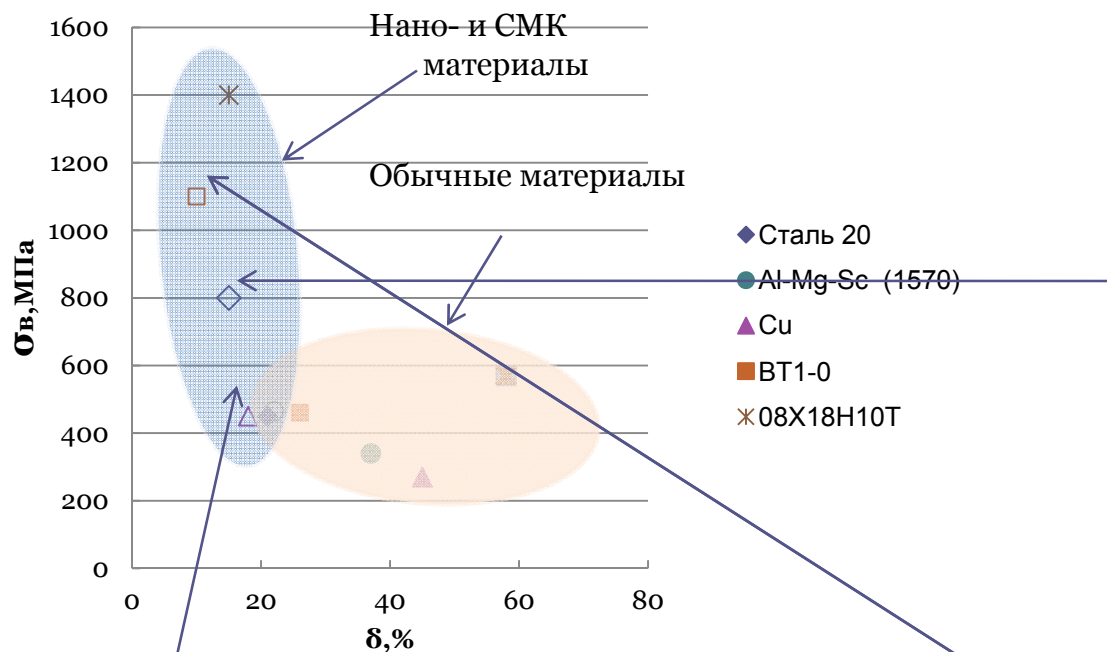
## Радиально-сдвиговая прокатка



## Ротационная ковка



# Нано- и субмикрористаллические (СМК) материалы, полученные интенсивной пластической деформацией (ИПД)

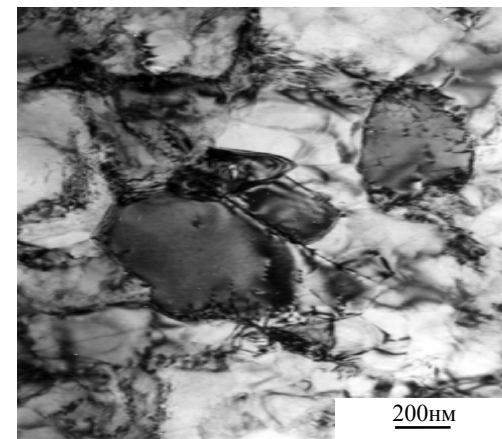


Cu

## МАТЕРИАЛЫ С РАЗМЕРОМ ЗЕРНА 50-500 НМ



Ст. 20



Ti

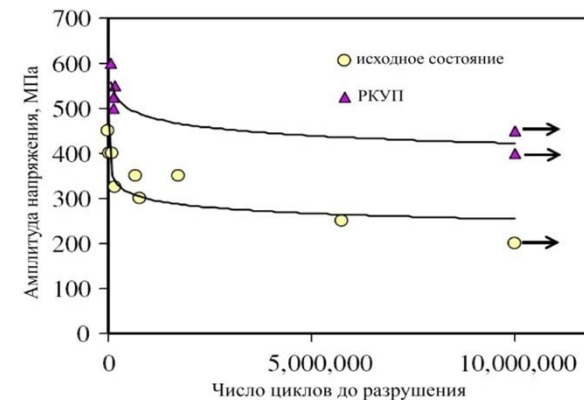


## Основной эффект :

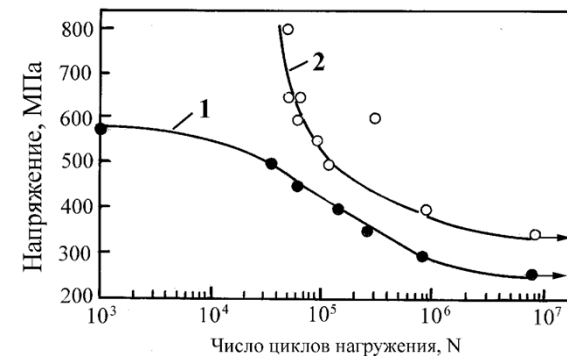
Значительное повышение прочности при достаточной пластичности и одновременном повышении эксплуатационных свойств:

- Усталостная прочность;
- Хладостойкость;
- Огнестойкость;
- Коррозионная стойкость;
- Электропроводность;
- Износостойкость;
- Биосовместимость.

## Усталостная прочность



СМК  $0,15\%C-0,25\%Si-1,1\%Mn$  сталь после РКУ прессования [Okayasu M. et al.]



СМК сталь  $08X18H10T$  после РКУ прессования (2) и в исходном состоянии (1) [В.Ф.Терентьев, С.В.Добаткин и др.]

# Механические свойства алюминиевых сплавов после РКУП



## Термически неупрочняемые сплавы:

Сплав 3103 (Al-1.1%Mn)  
Сплав 5182 (Al-4.0%Mg)



## Увеличение:

$\sigma_B$  -  
8...12%

$\sigma_{0,2}$  -  
6...9%

## Термоупрочняемые сплавы:

Сплав 6082 (Al-0.64%Mg-1.0%Si)  
Сплав 6060 (Al-0.74%Mg-0.6%Si)  
Сплав 6005 (Al-0.56%Mg-0.89%Si)

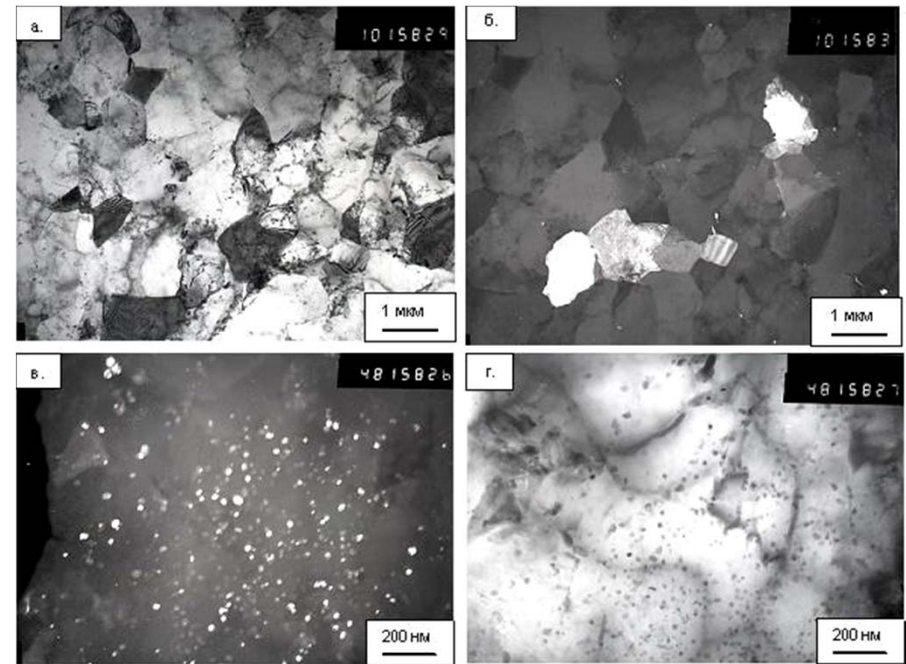
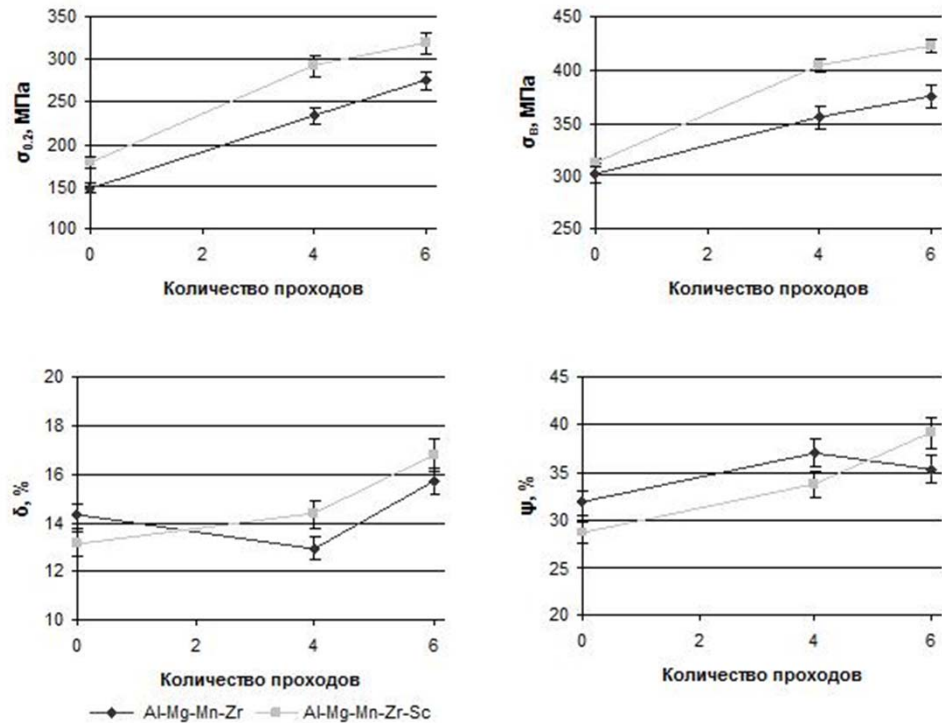


## Увеличение:

$\sigma_B$  -  
18...36%

$\sigma_{0,2}$  -  
16...28%

# Структура и свойства Al-4%Mg-1,5%Mn-0,4%Zr-0,4%Sc и Al-4%Mg-1,5%Mn-0,4%Zr сплавов после РКУП (T=300°C)



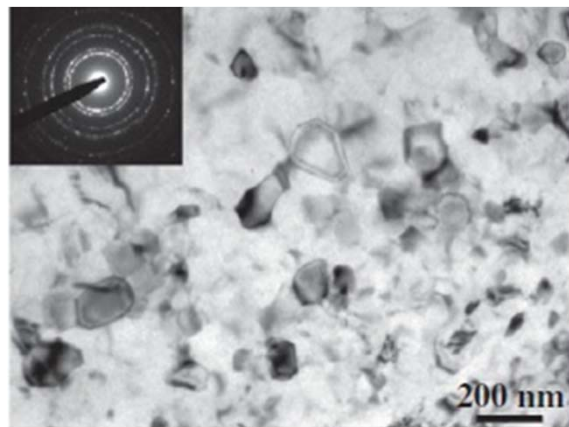
Структура сплава Al-Mg-Mn-Zr после РКУ-прессования с N=6; литая заготовка: светлое поле – (а,г); темное поле – (б,в); частицы  $Al_6Mn$  - (в,г). ПЭМ.

[ С.В. Добаткин, Ю.З. Эстрин и др., 2009 ]

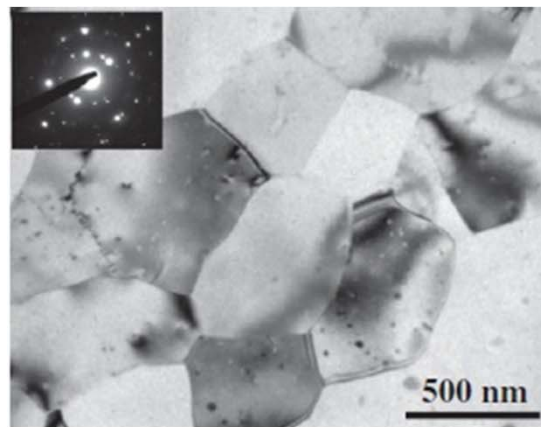
# Микроструктура, механические свойства и электропроводность Al сплава 6201 после КВД



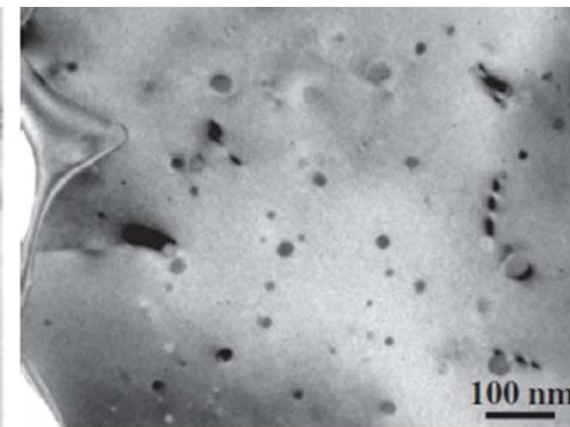
Processing	Structure	$a$ (Å)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\delta$ (%)	IACS (%)
SST	CG, $d = 65 \mu\text{m}$	4.0526	95	20.4	51.0
T81	CG	4.0512	330	6.1	53.6
HPT at RT	UFG, $d = 130 \text{ nm}$	4.0521	510	2.5	47.7
HPT at 130 °C	UFG, $d = 280 \text{ nm}$ , $d_p = 10 \text{ nm}$	4.0509	412	4.9	55.6
HPT at 180 °C	UFG, $d = 440 \text{ nm}$ , $d_p = 30 \text{ nm}$	4.0505	365	8.8	58.4
HPT at 230 °C	UFG, $d = 960 \text{ nm}$ , $d_p = 50 \text{ nm}$	4.0500	275	19.1	59.0



(a)



(b)

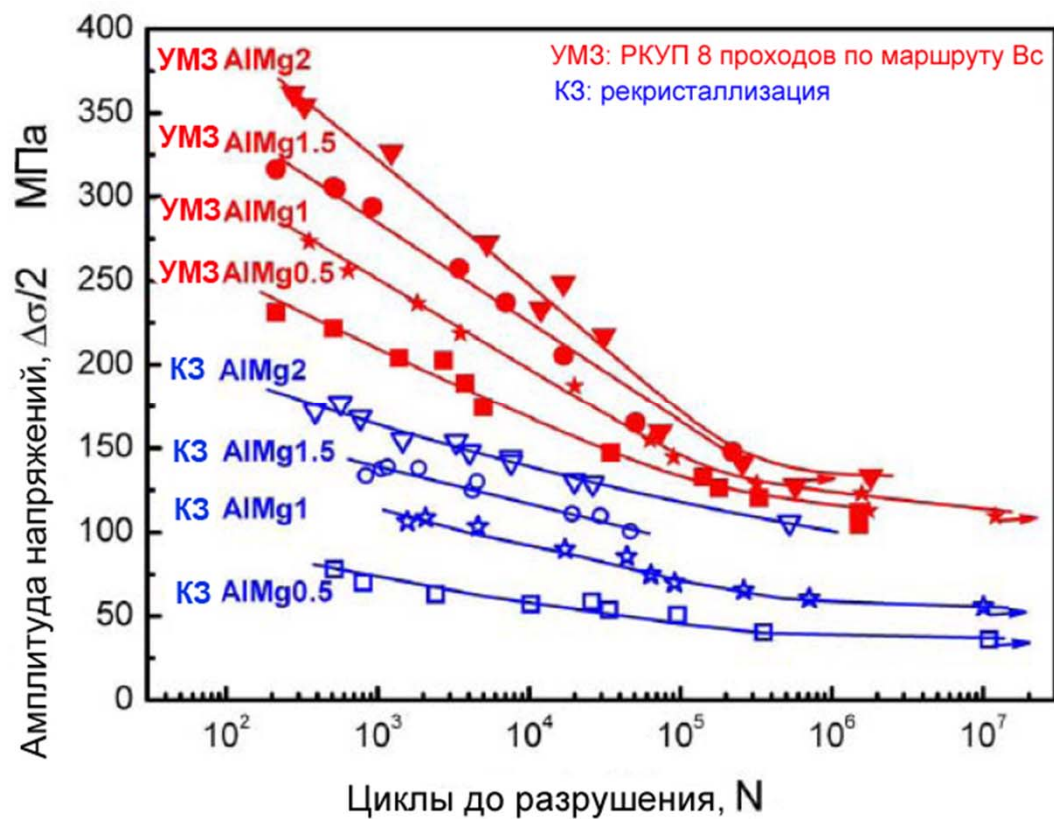


(c)

ПЭМ-изображения Al сплава 6201 после КВД при комнатной температуре (a) и при 180° C (b, c).

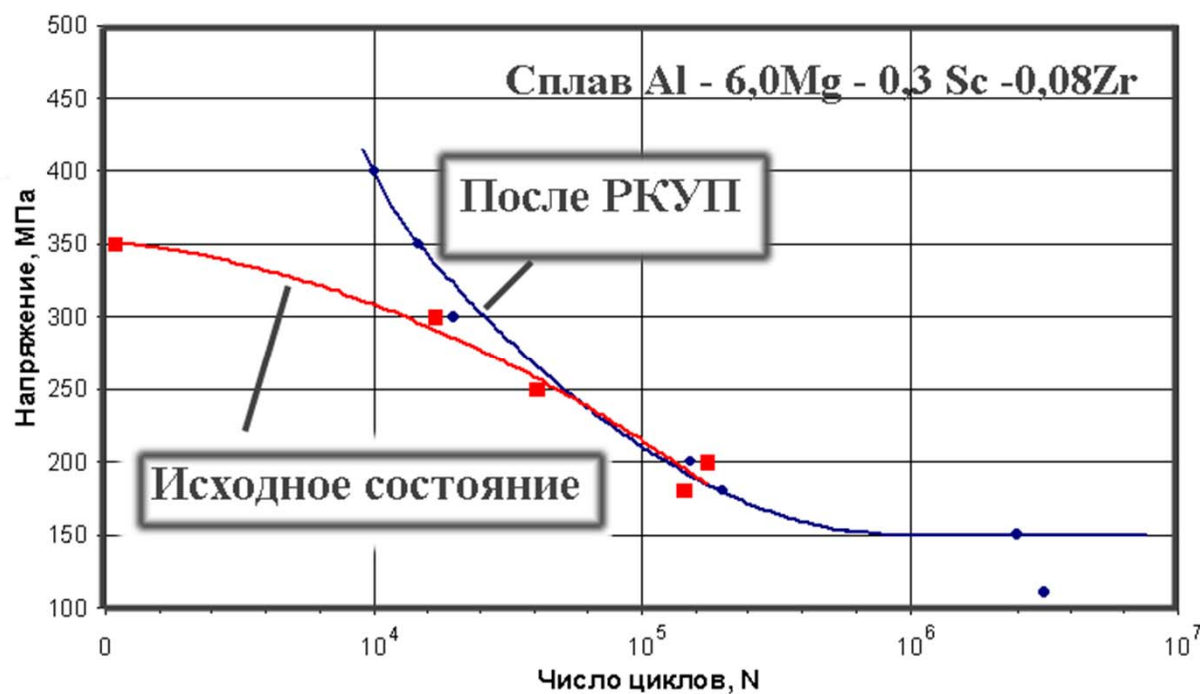
[ Р.З. Валиев и др., 2014]

# Усталостная прочность Al-Mg сплавов после РКУП



[H.W. Hoppel et al, 2008]

# Усталостная прочность Al-Mg-Sc сплава 01570 после РКУП

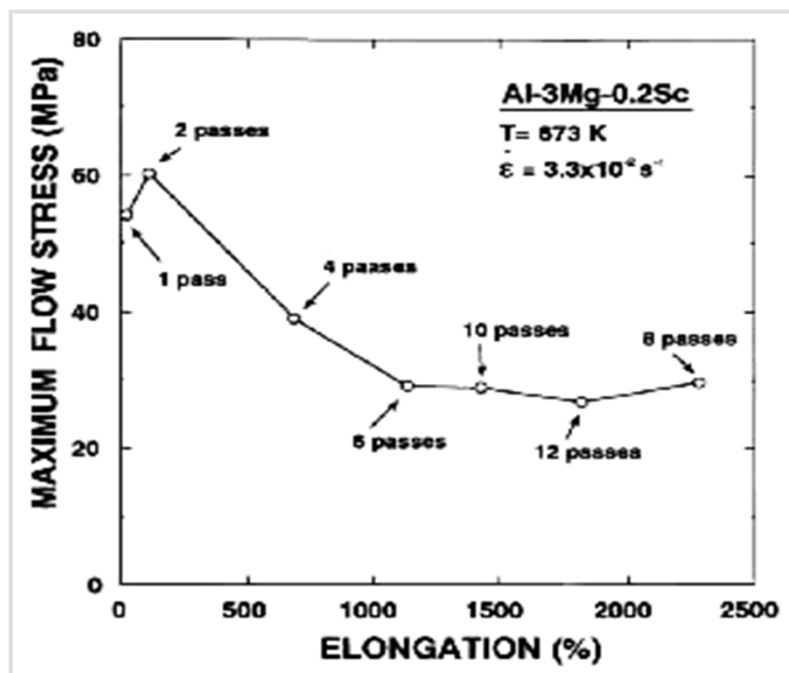


[В.Ф. Терентьев, С.В. Добаткин и др., 2010]

# Пластичность Al-Mg-Sc сплавов после РКУП

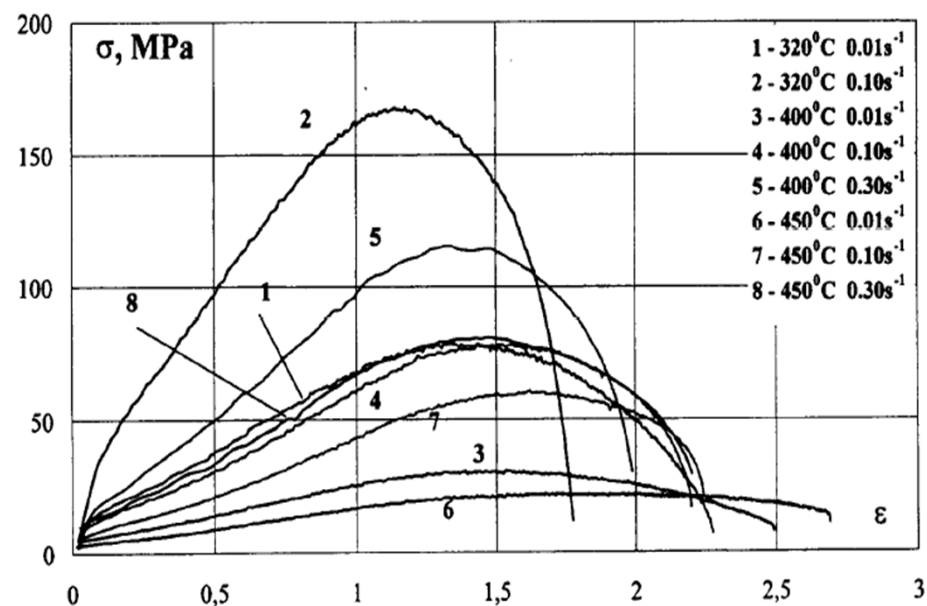


## Al-3%Mg-0,2%Sc сплав



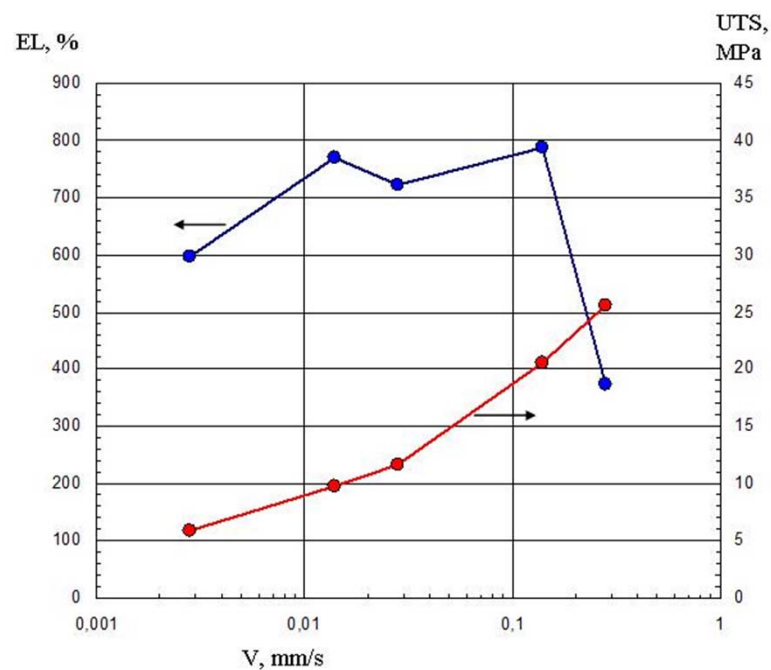
[Z Horita, T. Langdon et al, 2002 ]

## Al-4,5%Mg-0,22%Sc сплав



[В.Н. Перевезенцев, В.Н. Чувильдеев и др., 2002]

# Механические свойства Al-6%Mg и Al-6%Mg-0,3%Sc сплавов после РКУП (T=200°C, N=6)



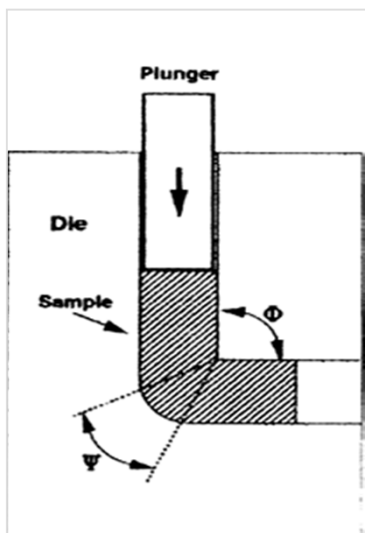
Сплавы	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Al-Mg-Sc, отжиг	135	340	29
Al-Mg-Sc, 01570, РКУП	370	475	18
Al-Mg, отжиг	135	325	36
Al-Mg, РКУП	285	420	15

[ С.В. Добаткин, В.В. Захаров и др., 2009 ]

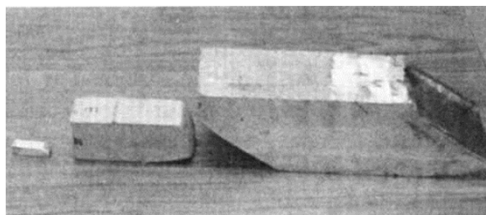
# Производство изделий из СМК алюминиевого сплава 6061



## РКУП

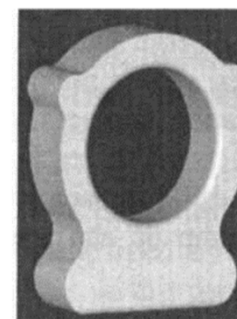
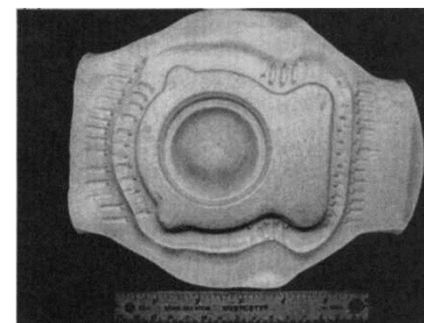


## Полуфабрикаты

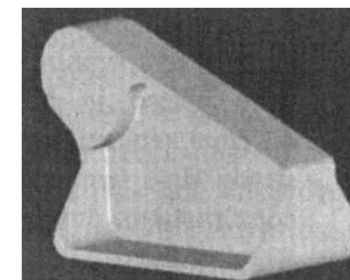


Размер поперечного сечения заготовки 12,5 мм, 50 мм и 100 мм

## Штамповка

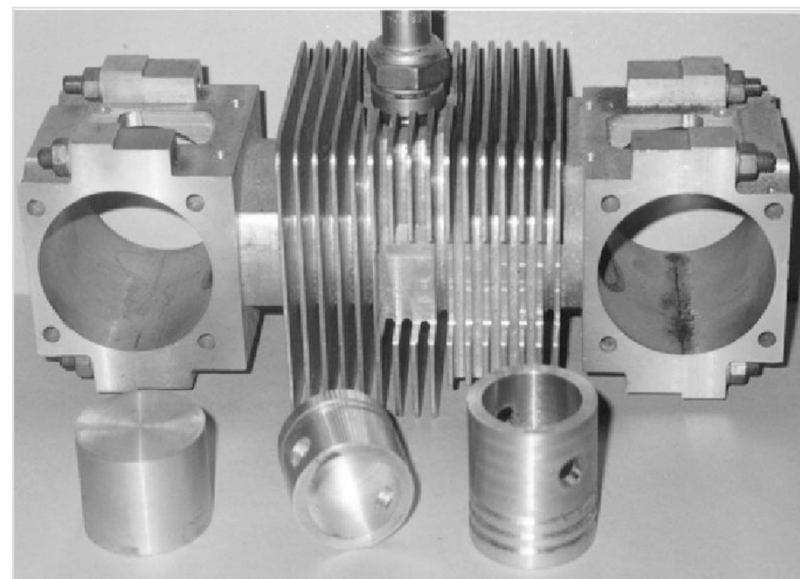
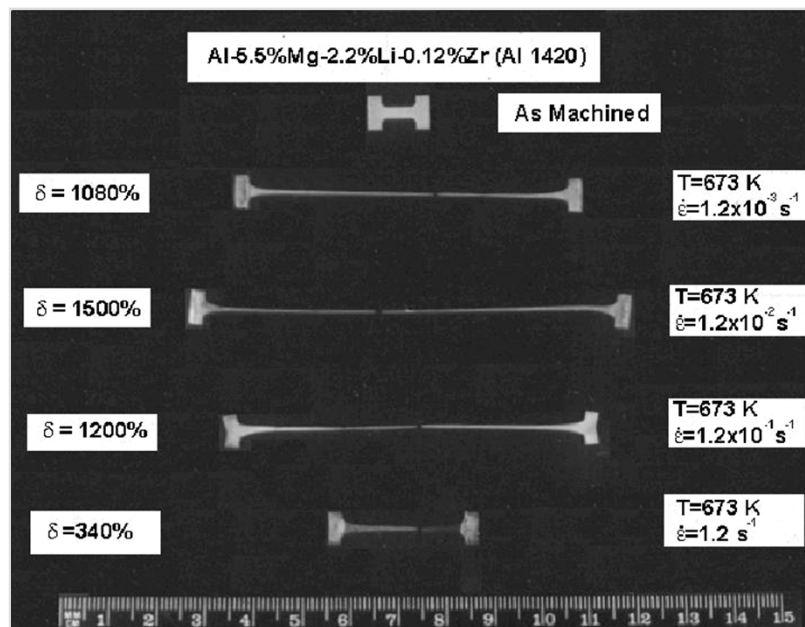


100 мм



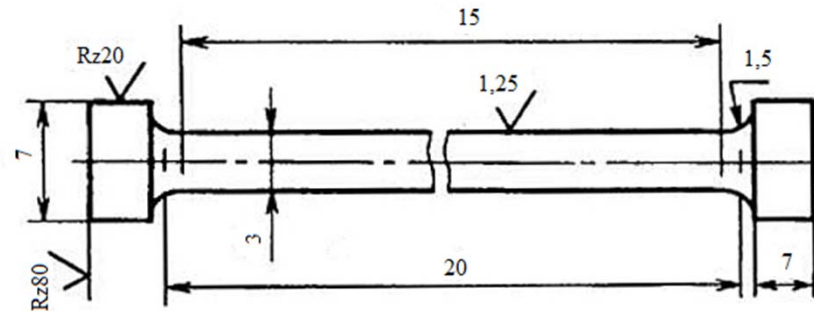
100 мм

# Низкотемпературная и высокоскоростная сверхпластичность алюминиевого УМЗ сплава 1420



[Р.З. Валиев и др.]

# Механические свойства магниевого сплава WE-43 системы Mg-Y-Nd-Zr после различной обработки

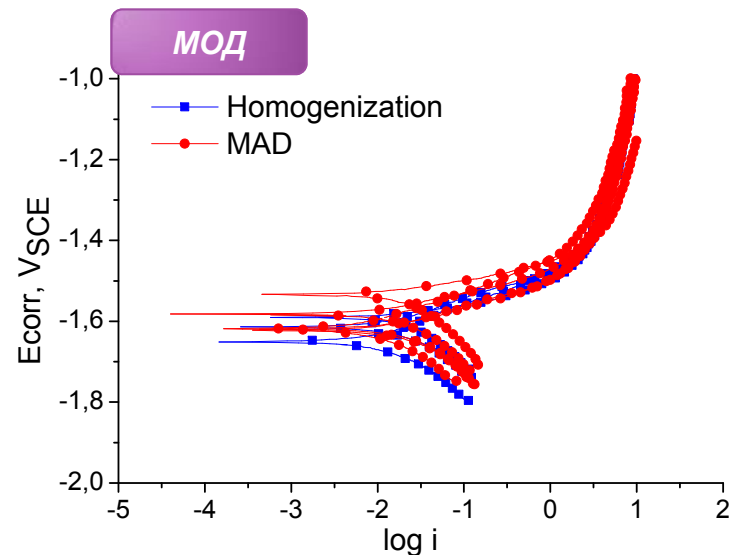
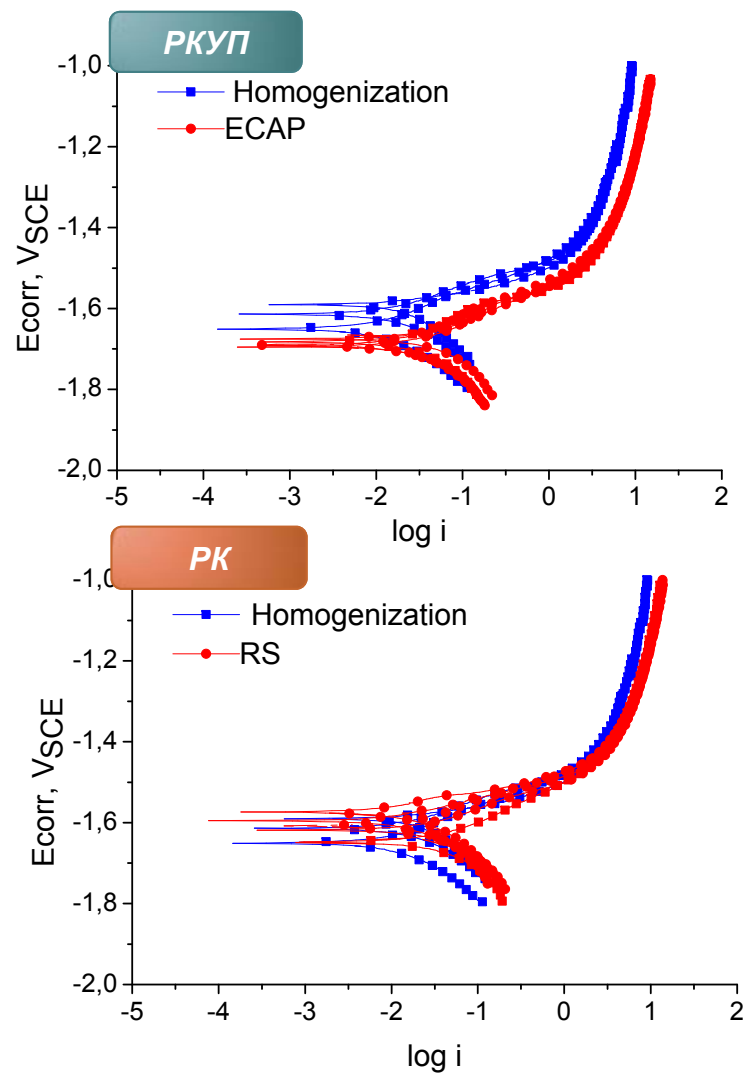


$T = 20^{\circ}\text{C}$

Обработка	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\sigma_{0.2}, \text{ МПа}$	$\delta, \%$
Гомогенизация 525°C, 8 ч	220	150	10.5
Равноканальное угловое прессование (РКУП)	300	260	12.4
Мультиосевая деформация	300	210	17.2
Ротационная ковка (РК)	415	285	7.0

[Добаткин С.В., Эстрин Ю.З. и др.]

# Электрохимическая коррозия УМЗ магниевого сплава WE-43. Потенциодинамический метод



Обработка	$E_{корр}, mV_{SCE}$	$i_{корр}, \mu A/cm^2$
Гомогенизация	$-1630 \pm 34$	$21.3 \pm 4.5$
ПКУП	$-1686 \pm 8$	$29.8 \pm 6.5$
МОД	$-1595 \pm 38$	$21.9 \pm 8.9$
PK	$-1608 \pm 27$	$30.0 \pm 11.6$

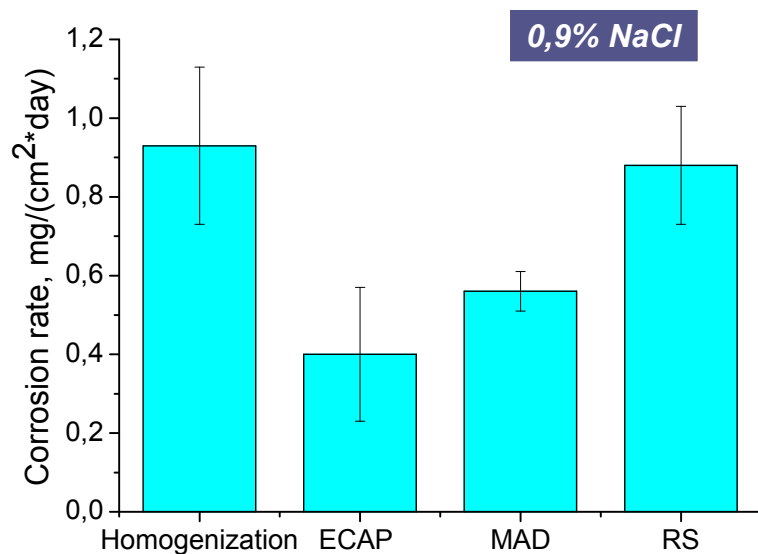
[Добаткин С.В., Эстрин Ю.З. и др.]

# Химическая коррозия при комнатной температуре УМЗ магниевого сплава WE43



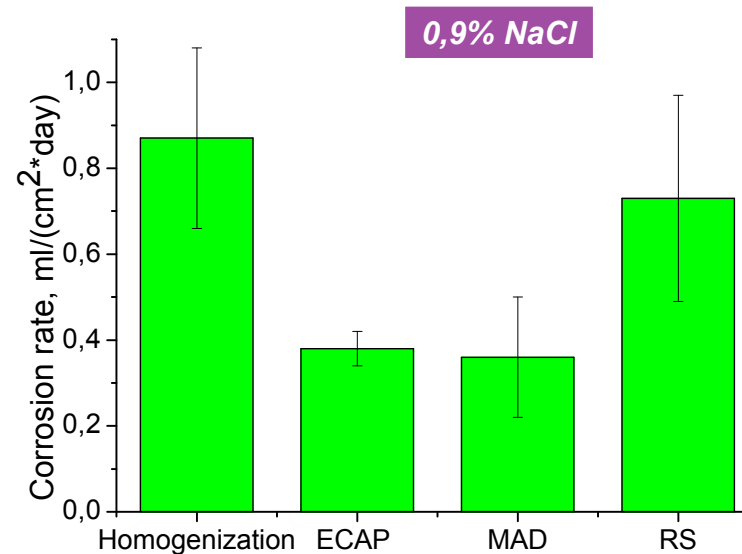
## Потеря массы

Скорость коррозии  
 $R_{\Delta m}$ , мг/(см<sup>2</sup>·день)



## Эволюция водорода

Скорость коррозии  
 $R_{\Delta m}$ , мл/(см<sup>2</sup>·день)

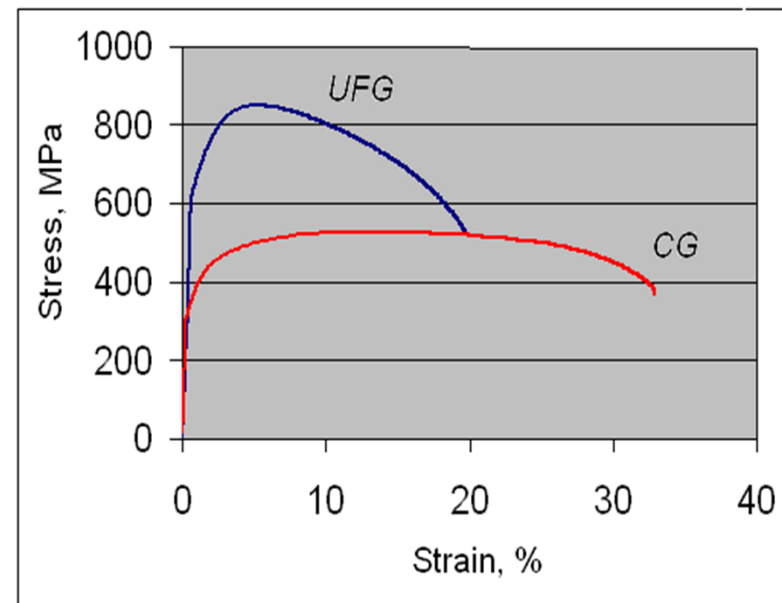


[Добаткин С.В., Эстрин Ю.З. и др.]

# Измельчение зерна и механические свойства технически чистого титана Grade 2



**Зеренная структура Ti после РКУП**



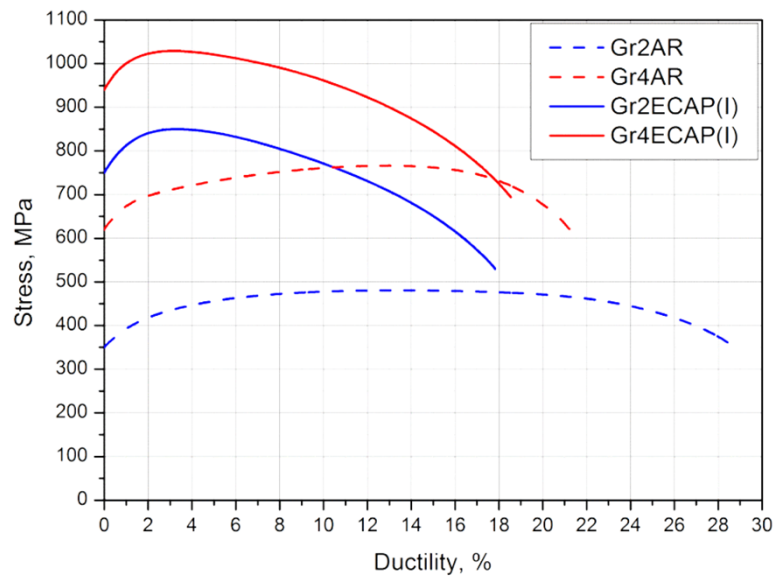
**Кривые растяжения крупнозернистого (CG) и ультраметкозернистого (UFG) Ti**

**[Эстрин Ю.З. и др.]**

# Механические свойства технически чистого титана Grade 2 и Grade 4



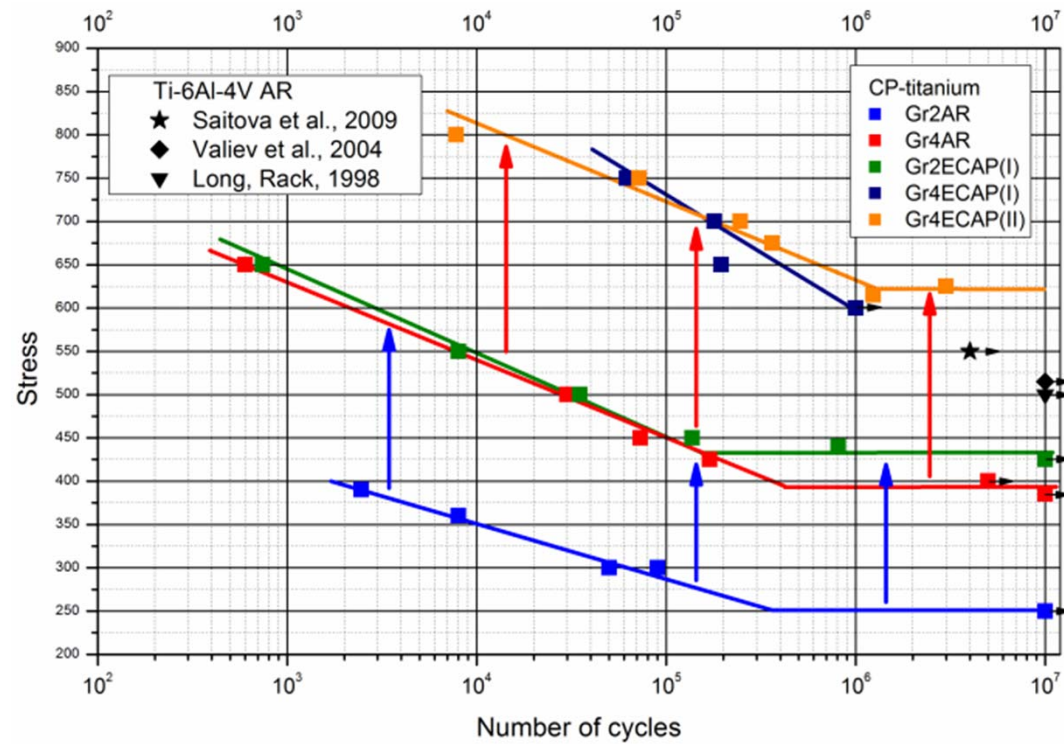
Condition	Средний размер зерна, мкм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %
Gr2AR	20	480	350	29
Gr2ECAP (I)	0.25	850	750	18
Gr4AR	30	765	620	21.5
Gr4ECAP (I)	0.23	1030	940	18.5
Gr4ECAP (II)	0.1	1275	1130	13



**Повышение прочности  
на 70-80 %**

**[Ю.З. Эстрин и др.]**

# Усталостные свойства титана Grade 2 и Grade 4

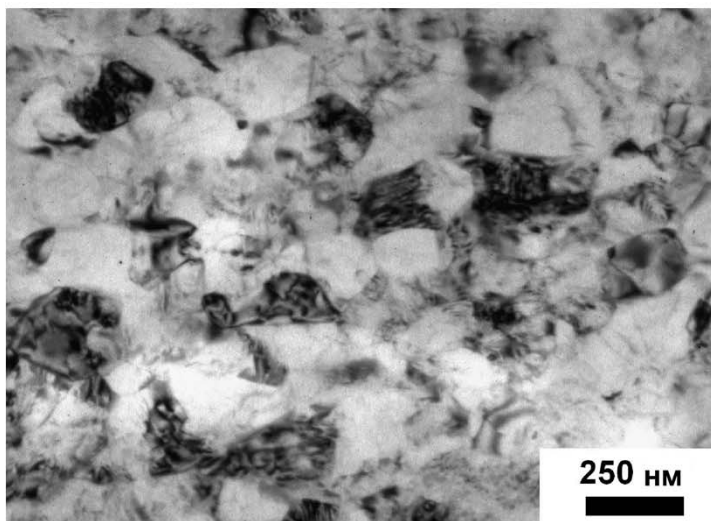


[Эстрин Ю.З. и др.]

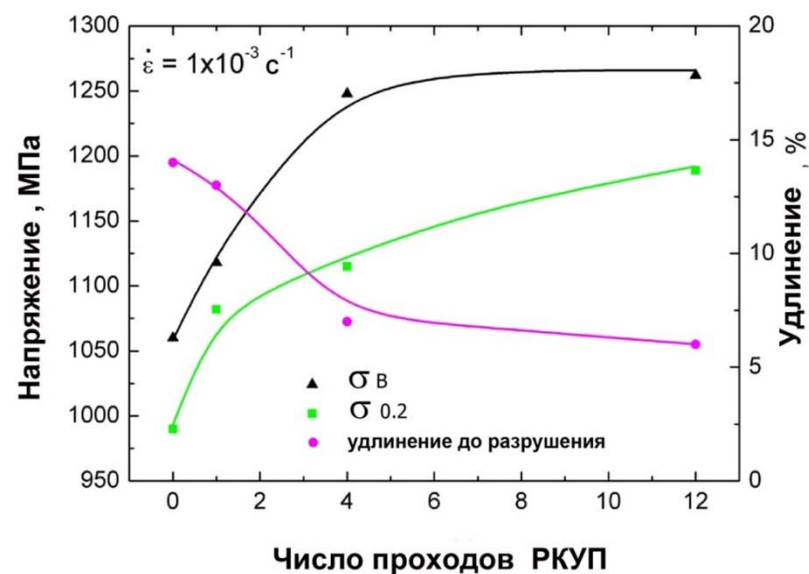
# Структура и свойства титанового сплава ВТ6 после РКУП



$D = 450 \text{ нм}$



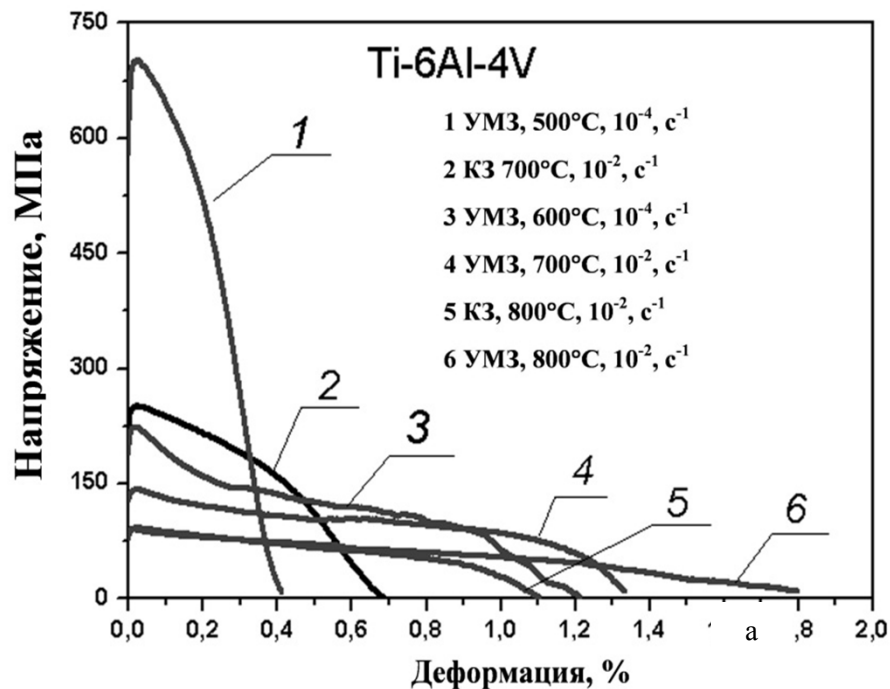
$\sigma_B = 1260 \text{ МПа}$



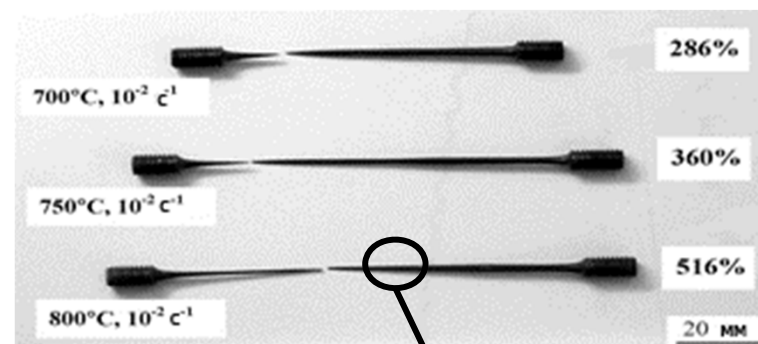
Зависимость прочности (а) и относительного удлинения (б) сплава ВТ6 от количества проходов РКУП

[Добаткин С.В., Рааб Г.И. и др.]

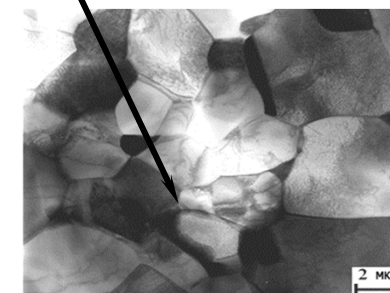
# Сверхпластичность УМЗ титанового сплава ВТ6 после РКУП



Кривые «напряжение – деформация» крупнозернистого (КЗ) и УМЗ сплава Ti-6Al-4V в разных условиях растяжения.



а.



б.

Образцы из УМЗ сплава Ti-6Al-4V после растяжения при температурах 700-800°C и  $\dot{\epsilon} = 10^{-2} s^{-1}$

**Высокоскоростная сверхпластичность  $\delta = 516\%$**

[Добаткин С.В., Рааб Г.И. и др.]

# Высокопрочный крепеж из наноструктурного титана VT1-0



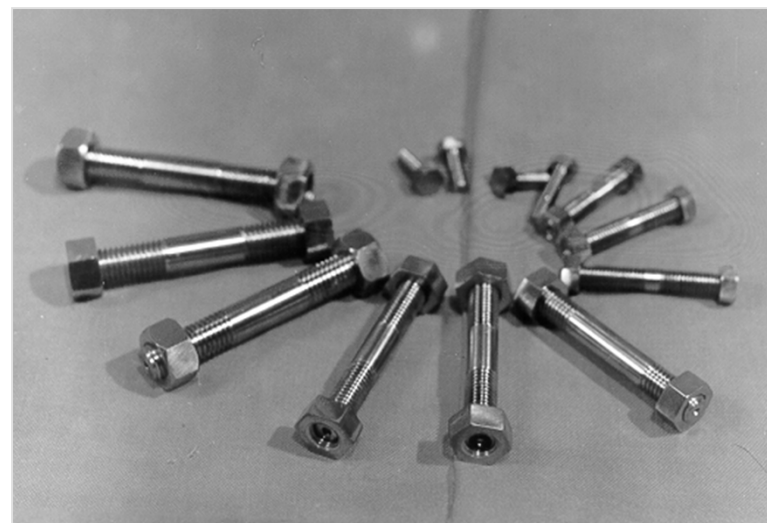
N	Состояние	Механические свойства				$\sigma_{-1}$ , МПа	Np
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %		
1	Крупнозернистое	460	400	27	60	255	4211
2	Наноструктурное	820	800	15	60	460	34504* 17504**

Примечание: \*- Нарезание резцом,

\*\* - Накатка роликом

$\sigma^{-1}$  – предел выносливости

Np – долговечность резьбового соединения



[Р.З. Валиев и др.]

## Заключение:



- ИПД алюминиевых сплавов приводит к измельчению зерен вплоть до наноуровня. Структура характеризуется относительно высокой плотностью дислокаций, неравновесными границами зерен и измененным фазовым составом. Такая структура обуславливает очень высокую прочность при удовлетворительной пластичности.
- Показана возможность одновременного повышения механических и эксплуатационных свойств объемных нано- и субмикроструктурных легких сплавов.
- В настоящий момент использование ИПД ультрамелкозернистых легких сплавов наиболее перспективно в качестве полуфабрикатов для дальнейшей формовки.



*Спасибо за внимание!*