



Институт физики металлов имени М. Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук



СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО AL-ZN-MG-FE-NI СПЛАВА С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРНА

Петрова А. Н.¹, Бродова И. Г.¹, Белов Н. А.², Акопян Т. К.², Разоренов С. В.³, Шорохов Е. В.⁴,
Завьялов З.С.⁴

¹*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*

³*Институт проблем химической физики РАН*

⁴ РФЯЦ-ВНИИТФ

СПЛАВЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

НИКАЛИНЫ – естественные алюмоматричные композиты на основе Ni –содержащей эвтектики. Al матрица - сплавы на основе системы Al-Zn-Mg (Cu)

Экономно легированные никалины на основе вырожденной эвтектики (Al+ Al₉FeNi) с заменой части Ni на Fe. Al матрица содержит Zn+Mg ~ 10%, не содержит Cu
Марка АЦ6Н0.5Ж

Сплавы подробно исследованы в литом состоянии, после горячей и холодной прокатки ^[1,2].

Преимущества: - высокая технологичность литья за счёт наличия эвтектики;
- экономичность за счёт замены Ni на Fe и возможности использования вторичного сырья;
- высокая прочность за счёт стандартной т/о матрицы как дисперсионно-твердеющего сплава

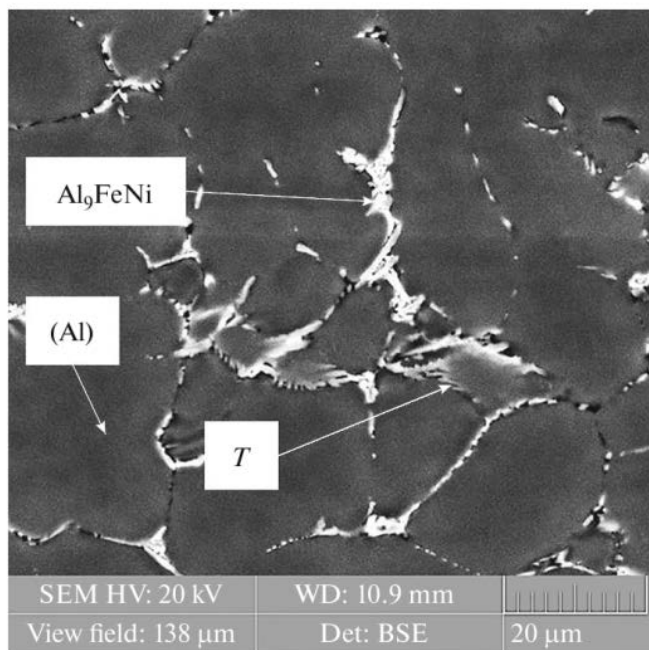
Применение: в качестве литейных сплавов для отливок сложной формы;
в качестве деформируемых сплавов для получения тонколистового проката*

* $\sigma_B = 400$ МПа, $\delta = 8\%$. После старения T1: $\sigma_B = 535$ МПа, $\delta = 2\%$.

[1] Белов Н.А., Наумова Е.А., Акопян Т.К. ЭВТЕКТИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ: НОВЫЕ СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ. Москва, 2016.

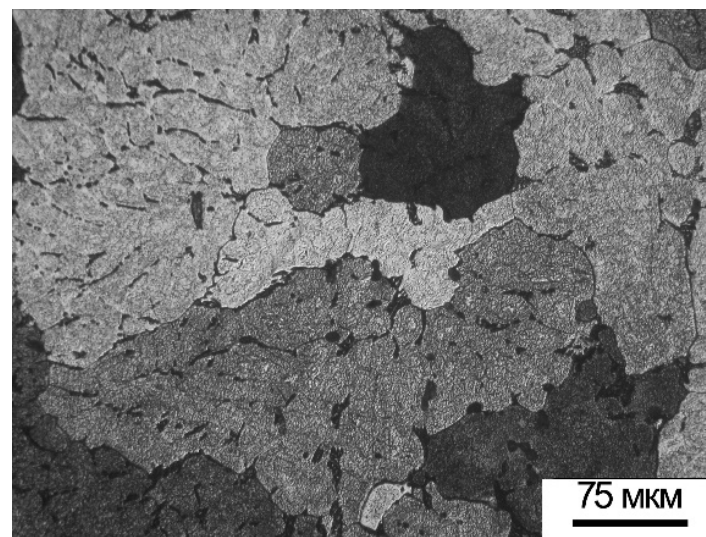
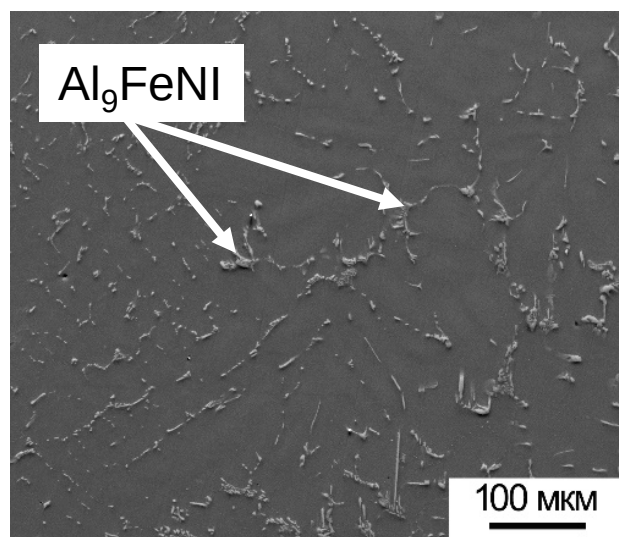
[2] Шуркин П.К., Белов Н.А., Акопян Т.К., Алабин А.Н., Алещенко А.С., Авксентьева Н.Н. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЭКОНОМНО-ЛЕГИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА “НИКАЛИН”. Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 9. С. 941-949.

Структура литого никалина



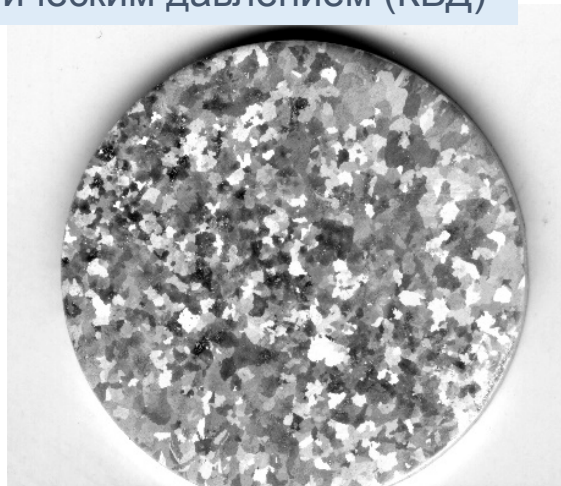
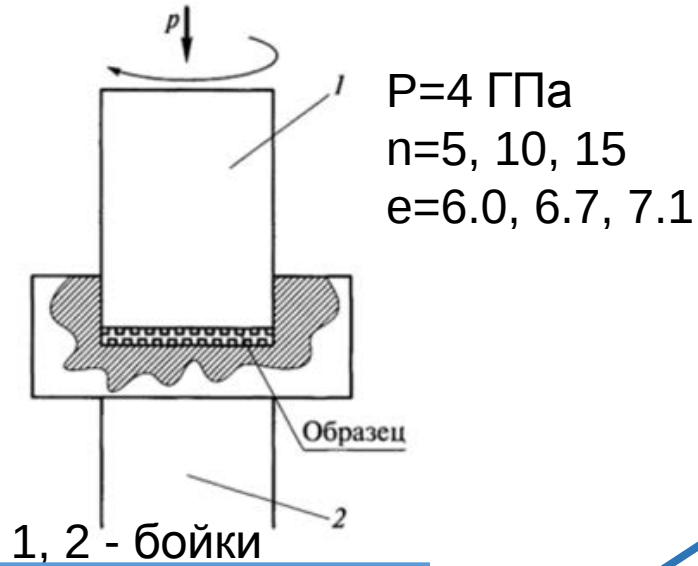
Литое состояние : Al тв. p - p + неравновесные вырожденные эвтектики
 $\text{Al}+T$ -фаза $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ и $\text{Al}+M$ - фаза MgZn_2
+ равновесная вырожденная эвтектика
 $\text{Al}+\text{фаза } \text{Al}_9\text{FeNi}$ (2-3 мкм).

Двухступенчатый гомогенизирующий отжиг: Al тв. p - p +эвт. фаза Al_9FeNi (2-2,5 мкм).

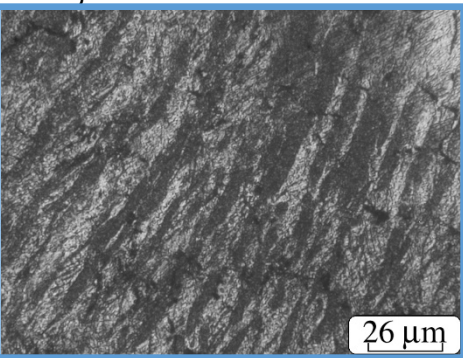


Создание субмикрористаллической (СМК) структуры

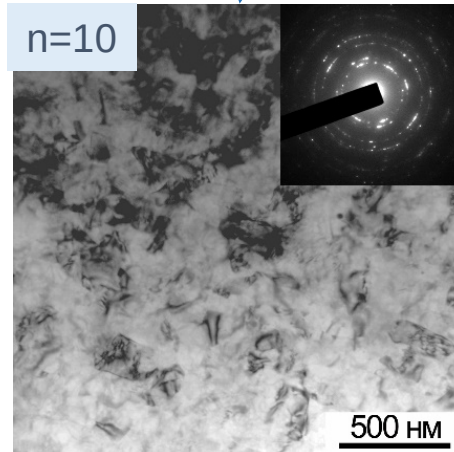
Кручение под высоким квазигидростатическим давлением (КВД)



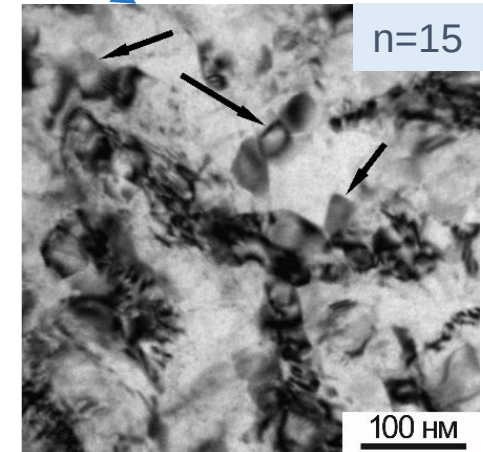
Размер зерна 380 мкм



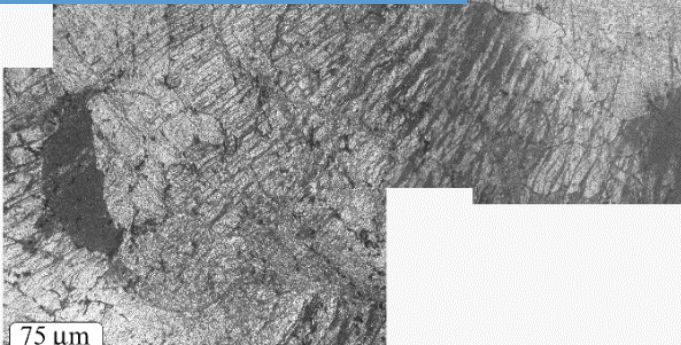
$n=5$



$n=10$

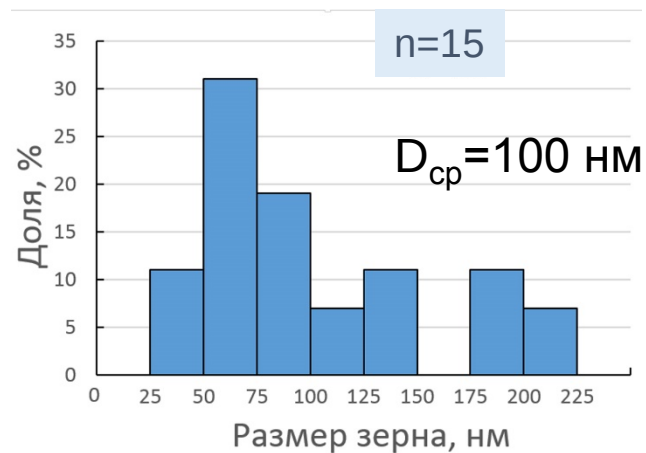
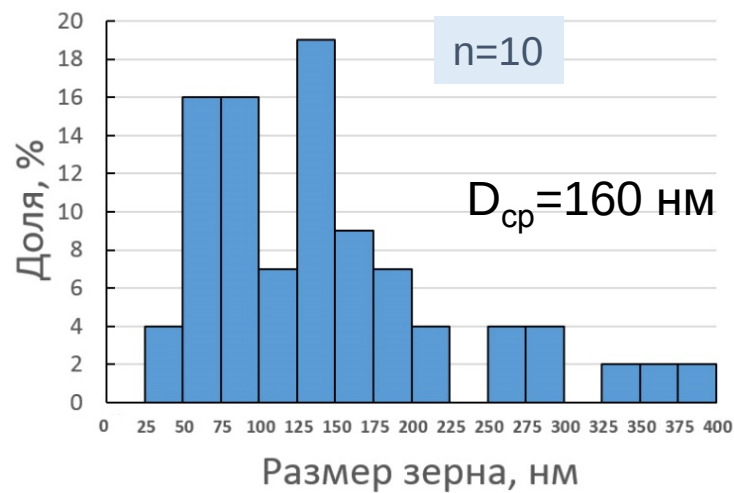


$n=15$



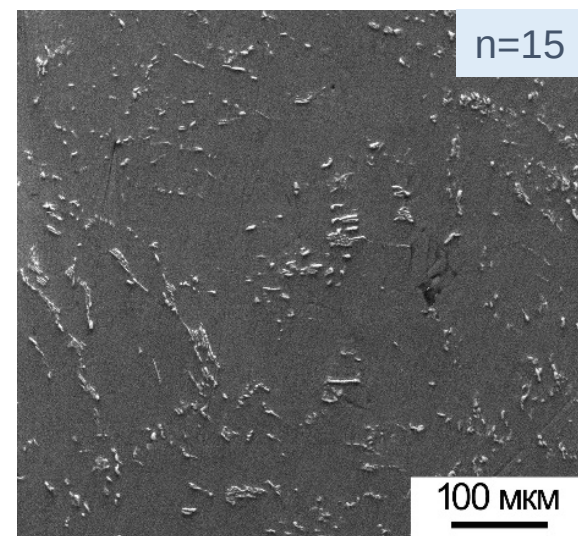
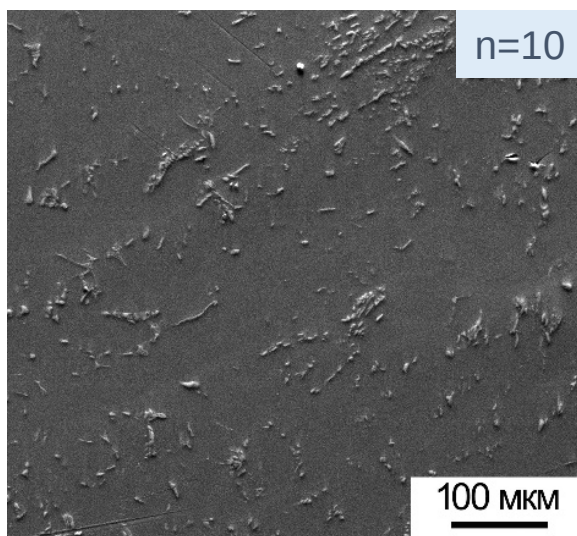
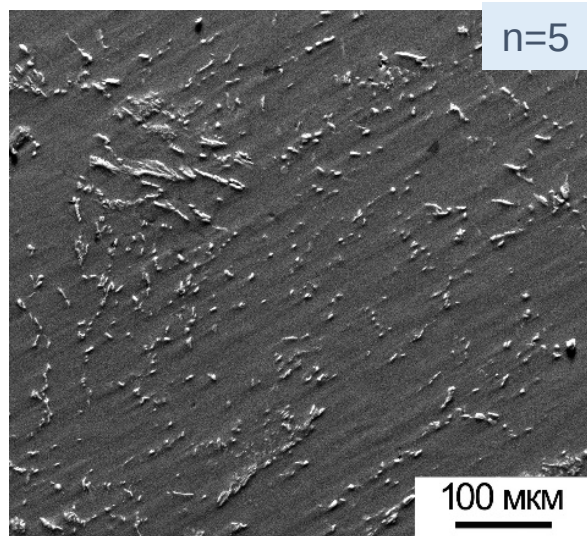
75 μm

Что происходит с матрицей?



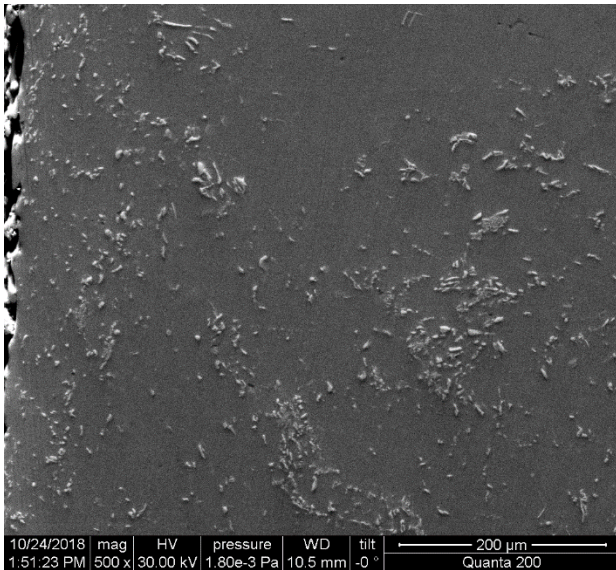
Что происходит с эвтектикой?

Представлена структура на середине радиуса образца

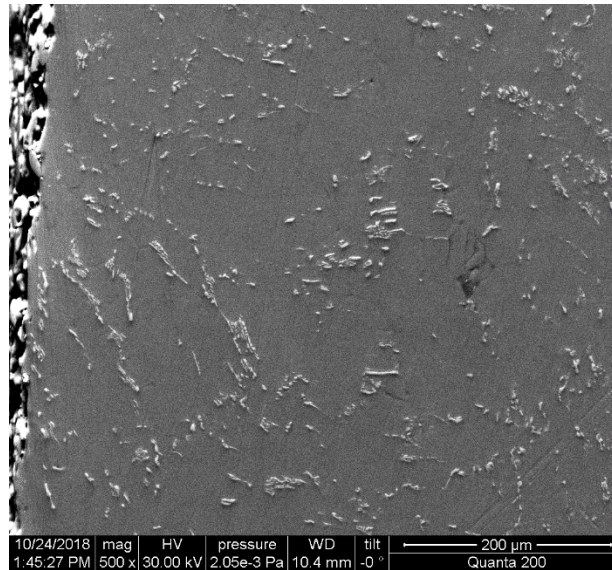


Эволюция эвтектической фазы по радиусу образца

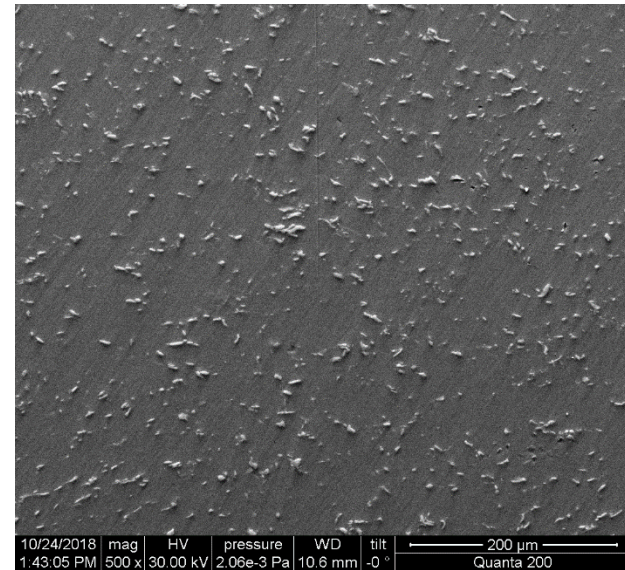
n=15



Центр образца



Середина радиуса



Край образца

$$e = \ln \left(1 + \frac{\varphi^2 r^2}{h_K^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Задача 1

Провести квазистатические и динамические испытания никалина и определить механические свойства сплава в широком интервале скоростей деформации.

Задача 2

Изучить влияние СМК структуры на механические свойства никалина.

■ Статическое одноосное растяжение плоских образцов

Скорость деформации 10^{-3} с^{-1}

Статические механические свойства оценивали по значениям условного предела текучести $\sigma_{0.2}$, временного сопротивления σ_B и относительного удлинения δ

■ Квазистатические испытания на сжатие методом Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона

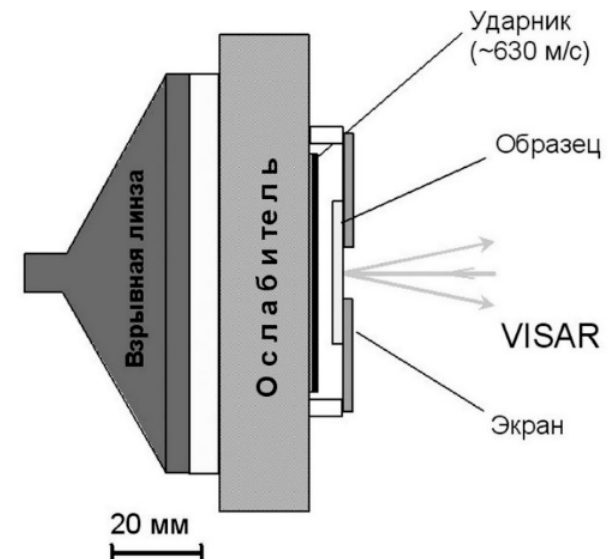
Скорость деформации $(1.4-5.0) 10^3 \text{ с}^{-1}$

Определяли $\sigma_{0.2}$ и σ_B

■ Ударно-волновое сжатие

Скорость деформации $(1.6-2.0) 10^5 \text{ с}^{-1}$

Определяли динамический предел упругости σ_{HEL} , динамический предел текучести γ и откольную прочность σ_{sp}



Механические свойства КК Никалина

Структура	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Статика		
Литая КК	220	350
Квазистатика		
Литая КК	415	649

Динамика

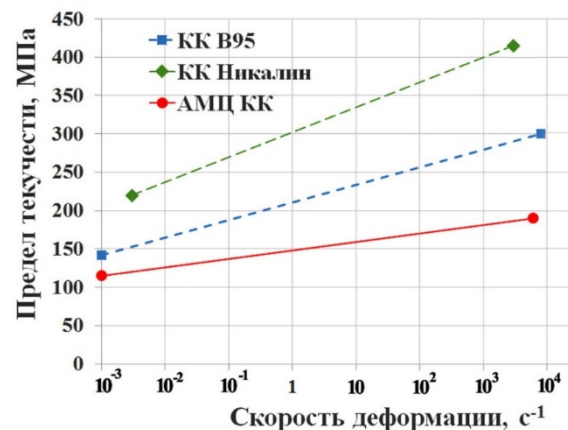
Структура	σ_{HEL} , МПа	Y , МПа	σ_{sp} , ГПа
Литая КК	600	120	1.3

Сравним со сплавом В95 Al-Zn-Mg-Cu Деформированный прутки

Структура	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Статика		
Деформ. КК	140	280
Квазистатика		
Деформ. КК	210	400

Динамика

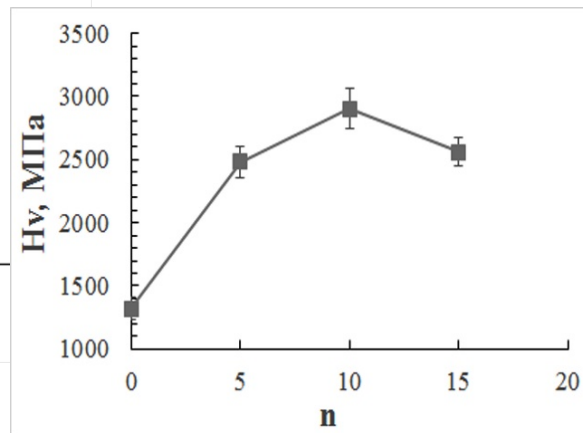
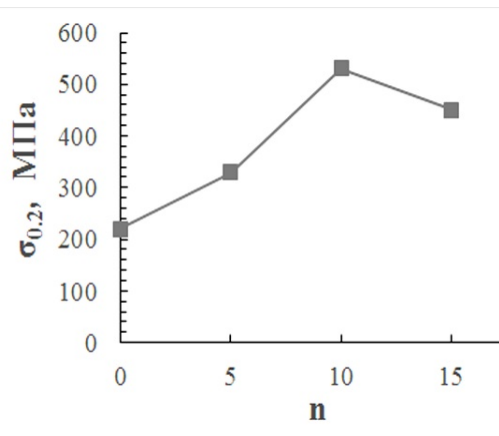
Структура	σ_{HEL} , МПа	Y , МПа	σ_{sp} , ГПа
Деформ. КК	280	140	1.38



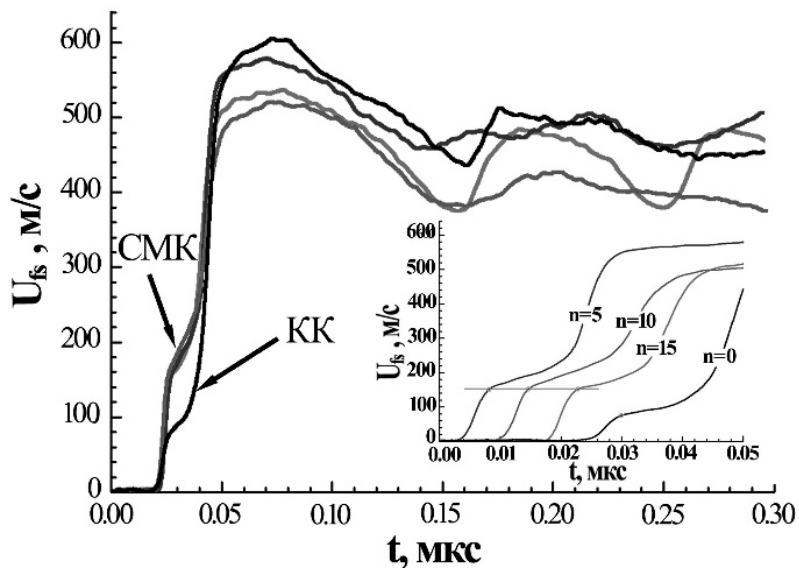
Влияние размера зерна на механические свойства никалина

■ Статическое одноосное растяжение плоских образцов

n	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
0	220	350	6
5	320	360	5
10	500	520	7
15	450	470	6



■ Ударно-волновое сжатие



Структура	Число оборотов, n	Деформация, e	σ_{HEL} , ГПа	γ , ГПа	σ_{sp} , ГПа
КК	-	-	600	120	1.3
CMK	5	6.0	1200	200	1.1
CMK	10	6.7	1220	210	1.3
CMK	15	7.1	1230	210	1.3

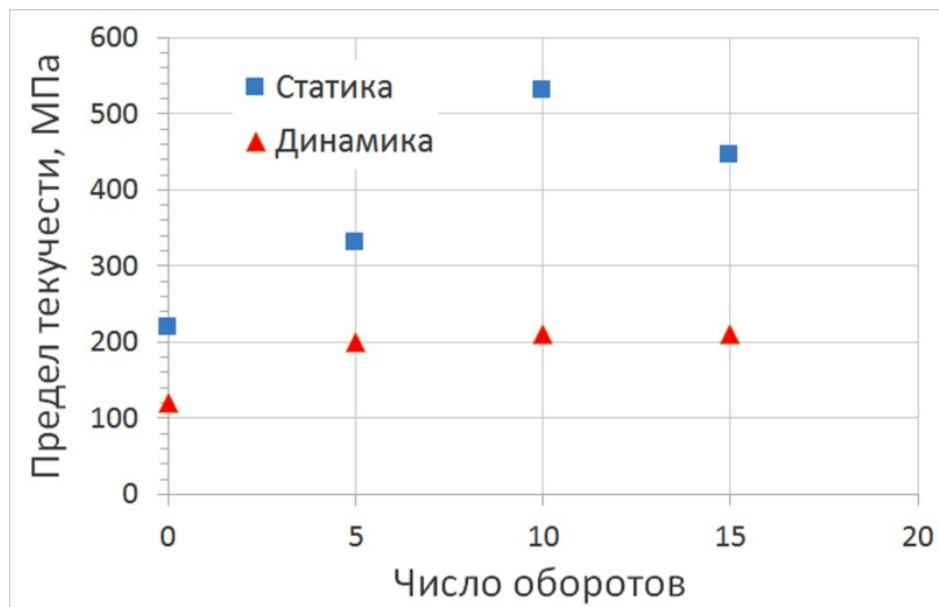
- Измерены механические свойства КК никалина в широком интервале скоростей деформации от 10^{-3} до 10^5 с^{-1} . Установлено, что повышение скорости деформации от статического до квазистатического диапазона приводит к повышению условного предела текучести от 220 до 415 МПа, а предела прочности с 350 до 649 МПа, т.е. в 1.9 и 1.8 раза соответственно. Определены динамические механические характеристики: предел упругости Гюгонио, динамический предел текучести и откольная прочность, равные 600, 120 и 1300 МПа.
- Рассмотрена эволюция структурообразования никалина в процессе большой пластической деформации сдвигом под давлением, и получен СМК (160-110 нм) алюмоматричный композит, содержащий дисперсные (2 мкм) тройные алюминиды железа и никеля эвтектического происхождения. Установлены механизмы формирования СМК структуры в зависимости от величины деформации, в частности, переход от фрагментации к динамической рекристаллизации при $\epsilon \geq 7.1$ ($n \geq 15$).

● Проведён контроль упрочнения СМК композита. Установлено, что до $n < 10$ наблюдается рост прочностных характеристик в 1,5-2 раза по сравнению с КК состоянием. При $n = 15$ прочность СМК композита понижается за счёт частичного прохождения динамической рекристаллизации. Условный предел текучести достигает максимального значения 500 МПа при $n = 10$. Свойства СМК композита превышают прочностные характеристики КК аналога ($\sigma_{0.2}$ на 150%, σ_B на 50%) с сохранением хорошей пластичности ($\delta = 7\%$).

● Выполнен эксперимент по ударно-волновому сжатию образцов никалина в СМК состоянии, и определены динамические свойства материала с разным размером зерна (СМК и КК). Согласно сопоставлению профилей скорости свободной поверхности нагруженных образцов, значения динамических характеристик не изменяется с ростом n , т.е. не зависят от размера и типа СМК структуры. Сравнение с динамическими характеристиками КК никалина показывает, что измельчение структуры сплава до субмикронного масштаба приводит к существенному росту σ_{HEL} и Y в 1.8-2.0 раза. Откольная прочность СМК и КК никалина совпадают, т.е. перевод сплава в СМК состояние не снижает динамическую прочность материала.

Спасибо за внимание!

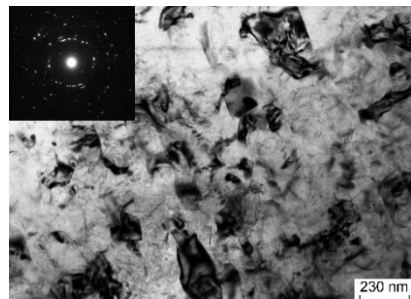
Сравнение механических характеристик СМК никалина в статике и динамике



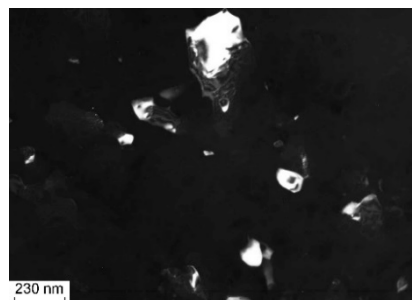
Никалин в СМК состоянии как при статических, так и при динамических нагрузках имеет более высокие прочностные свойства, но измельчение структуры до наноуровня не даёт прироста прочности.

Деформационное поведение СМК никалина при динамическом нагружении отличается от поведения других СМК Al сплавов, составы которых находятся в области твёрдого раствора (АМц, В95, А5083).

Ударно-волновое сжатие сплава А 5083 , полученного КВД

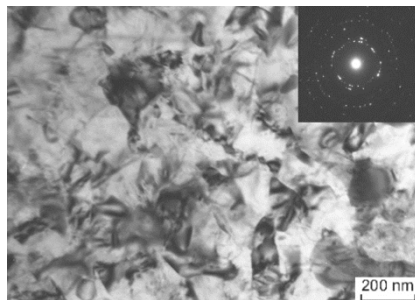


Эволюция структуры сплава А 5083 при КВД

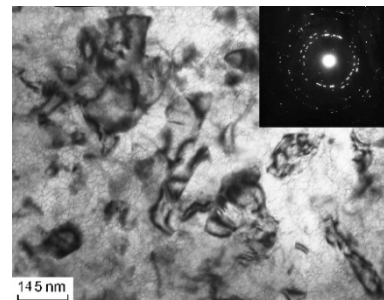


$n=1, e=7.0$ $D_{cp.} = 250 \text{ nm}$

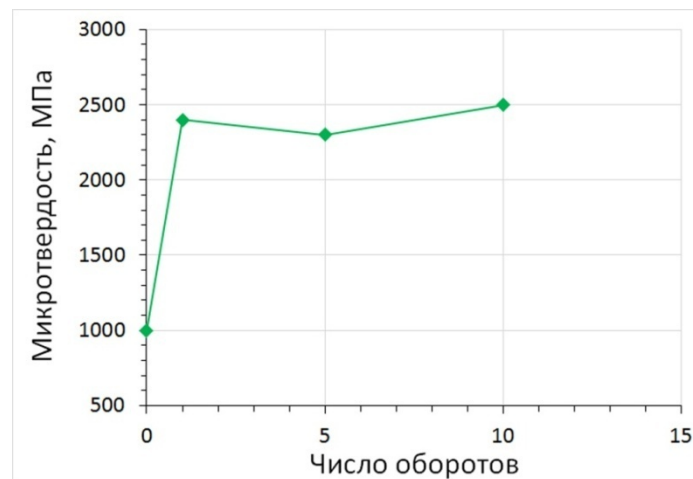
С ростом накопленной деформации размер зерен уменьшается, и структура становится более одномасштабной.



$n=5, e=8.6$ $D_{cp.} = 200 \text{ nm}$



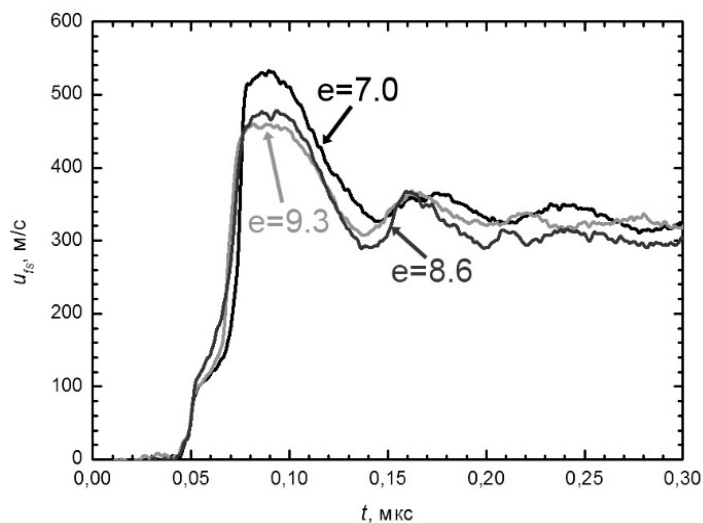
$n=10, e=9.3$ $D_{cp.} = 80 \text{ nm}$



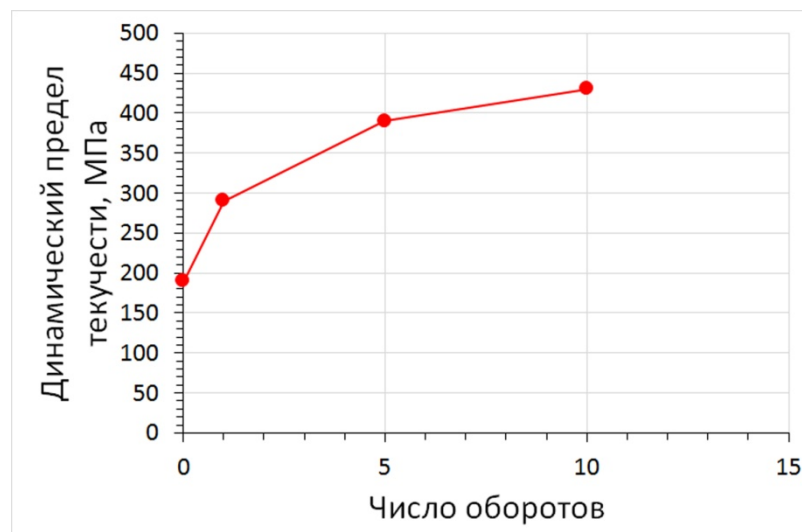
Зависимость твёрдости СМК сплава А 5083 от n

Механизм формирования СМК и НК структуры
- динамическая рекристаллизация

Динамические свойства сплава А 5083, полученного КВД



Зависимость $\bar{Y}$ от числа оборотов



структура	σ_{HEL} , ГПа	$\bar{Y}$, ГПа
КК	0.37	0.19
СМК (n=1)	0.57	0.32
СМК (n=5)	0.78	0.39
НК (n=10)	0.85	0.43

σ_{HEL} , $\bar{Y}$

выше, чем у КК, в 2 раза

Самые высокие значения динамического предела текучести получены в НК состоянии