



Тема роботи:

Структура та механічні властивості  
багатокомпонентних високоентропійних  
AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплавів  
отриманих методом механічного  
легкування

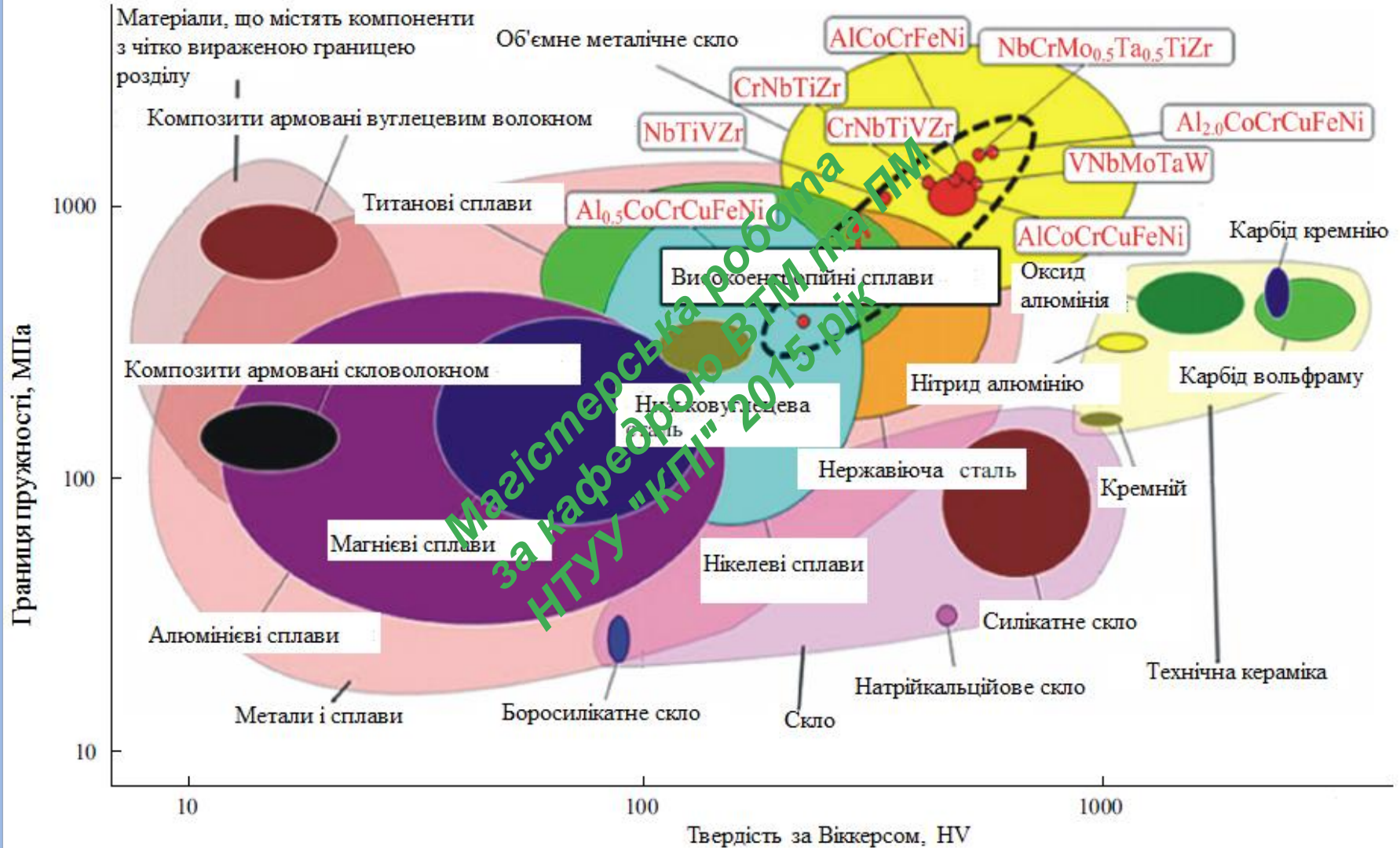
Магістерська робота  
за кафедрою ВТМ та ПМ  
НТУУ "КПІ" 2015 рік

**Виконала:**

студент групи ФК-92  
Кравченко О.І.

**Керівник:** Юркова О.І.

# Актуальність теми:



**Метою роботи** є дослідження структури та механічних властивостей багатокomпонентних високоентропійних AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплавів отриманих методом механічного легування з подальшою консолідацією спіканням під тиском

**Об'єкт дослідження** – високоентропійні багатокomпонентні AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплави

**Основні завдання:**

- Одержати високоентропійні багатокomпонентні AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплави методом механічного легування у планетарному млині в середовищі бензину;
- Дослідити фазовий склад та мікроструктуру порошку сплавів, під час процесу МЛ;
- Методом спікання під тиском провести консолідацію порошкових AlCuNiFeCr, AlCuNiFeTi високоентропійних сплавів та дослідити їх структуру, фазовий і хімічний склад;
- Методом індентування визначити комплекс механічних властивостей (мікротвердість, характеристику пластичності, модуль пружності, границю плинності та пропорційності) спечених AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi високоентропійних сплавів.

# Методика проведення експерименту

Вибір вихідних елементів для високоентропійних сплавів



Механічне легування вихідних порошкових сумішей



Консолідація порошкових ВЕСів методом спікання під тиском



Дослідження структури та  
фазового складу

Скануючий  
електронний мікроскоп  
з мікроаналізатором:  
PEMMA 101-A

Дифрактометр:  
RIGAKU Ultima IV



Визначення механічних  
характеристик

Мікротвердість HV, НМ  
Характеристика  
пластичності  $\delta_n$ , границя  
пропорційності, границя  
текучості  
Мікротвердомір: ПМТ-3

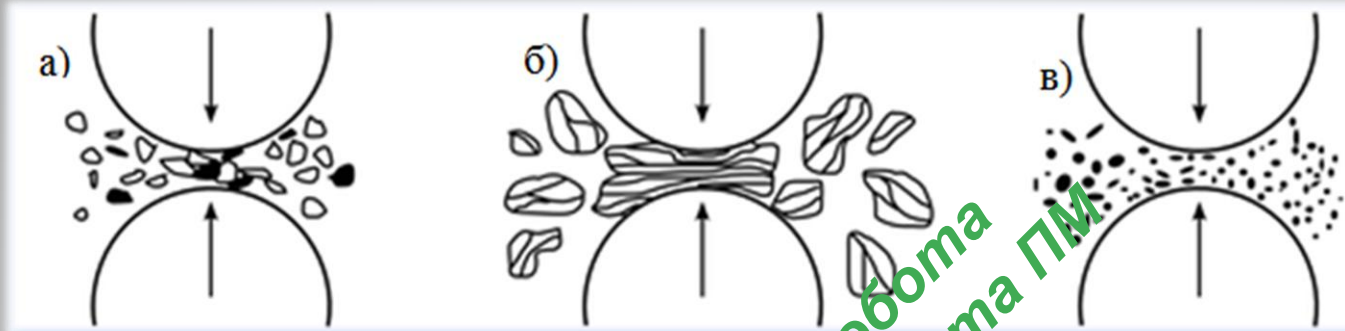
Магістерська робота  
за кафедрою ВТМ та ПМ  
НТУУ "КПІ" 2015 рік

# Умови отримання стабільних твердих розчинів

- а) конфігураційна ентропія вихідних компонентів повинна бути більша за  $1,61R \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  ;
- б) значення ентальпії змішування може коливатися в межах  $-22 < \Delta H_{\text{mix}} < 7 \text{ кДж/моль}$  ;
- в) атомні радіуси елементів можуть відзнятися в інтервалі значень  $0 < \delta < 8,5 \%$ .
- Г) значення концентрації валентних електронів в діапазоні від 6,87 до 8, вказує на формування твердих розчинів з ГЦК і ОЦК решіткою.

Сплав	Ентропія змішання $\Delta S_{\text{mix}}$ , $\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Ентальпія змішання $\Delta H_{\text{mix}}$ , $\text{кДж/моль}$	Різниця атомних радіусів $\delta$ , %	Різниця електронегативності $\Delta \chi$	КВЕ
AlCuNiFeCr	13,38	-4	4,9	0,193	7,6
AlCuNiFeTi	13,38	-17,6	7,16	0,154	7,2

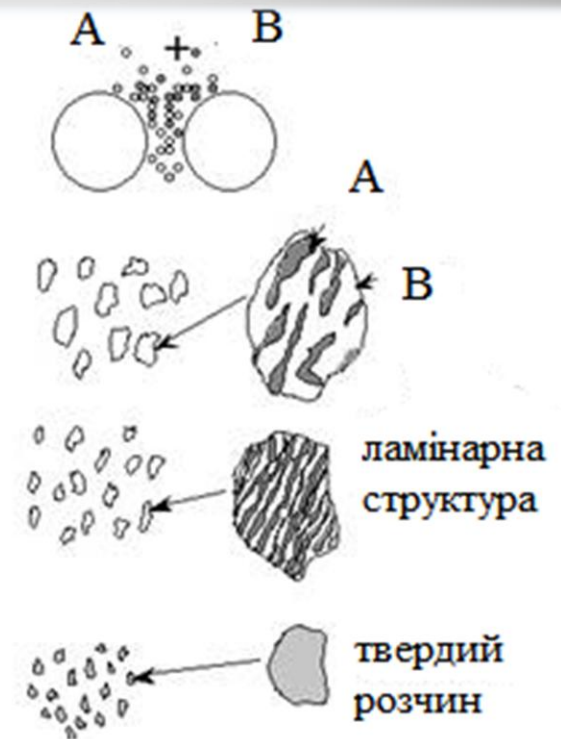
# Отримання ВЕСів методом МЛ у планетарному млині



а) дроблення і холодне зварювання вихідного матеріалу

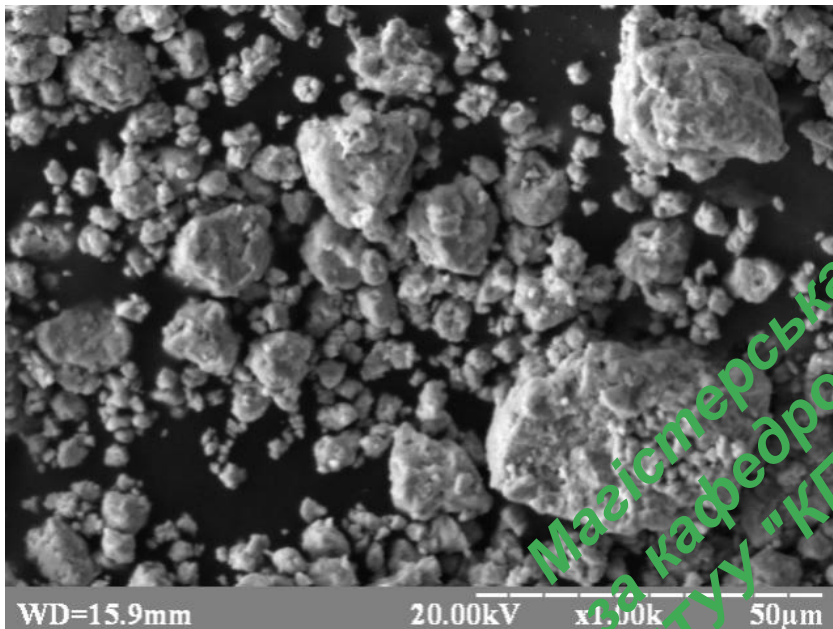
б) формування шаруватих структур

в) зменшення розмірів частинок порошку, і утворення наноструктур

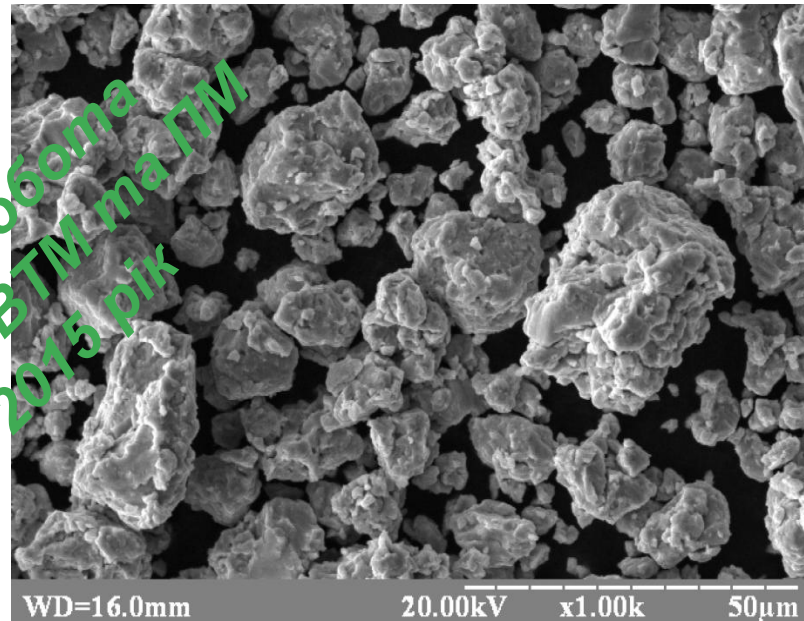


Магістерська робота  
за кафедрою ВТМ та ПМ  
НТУУ "КПІ" 2015 рік

## Морфологія частинок порошків після МЛ



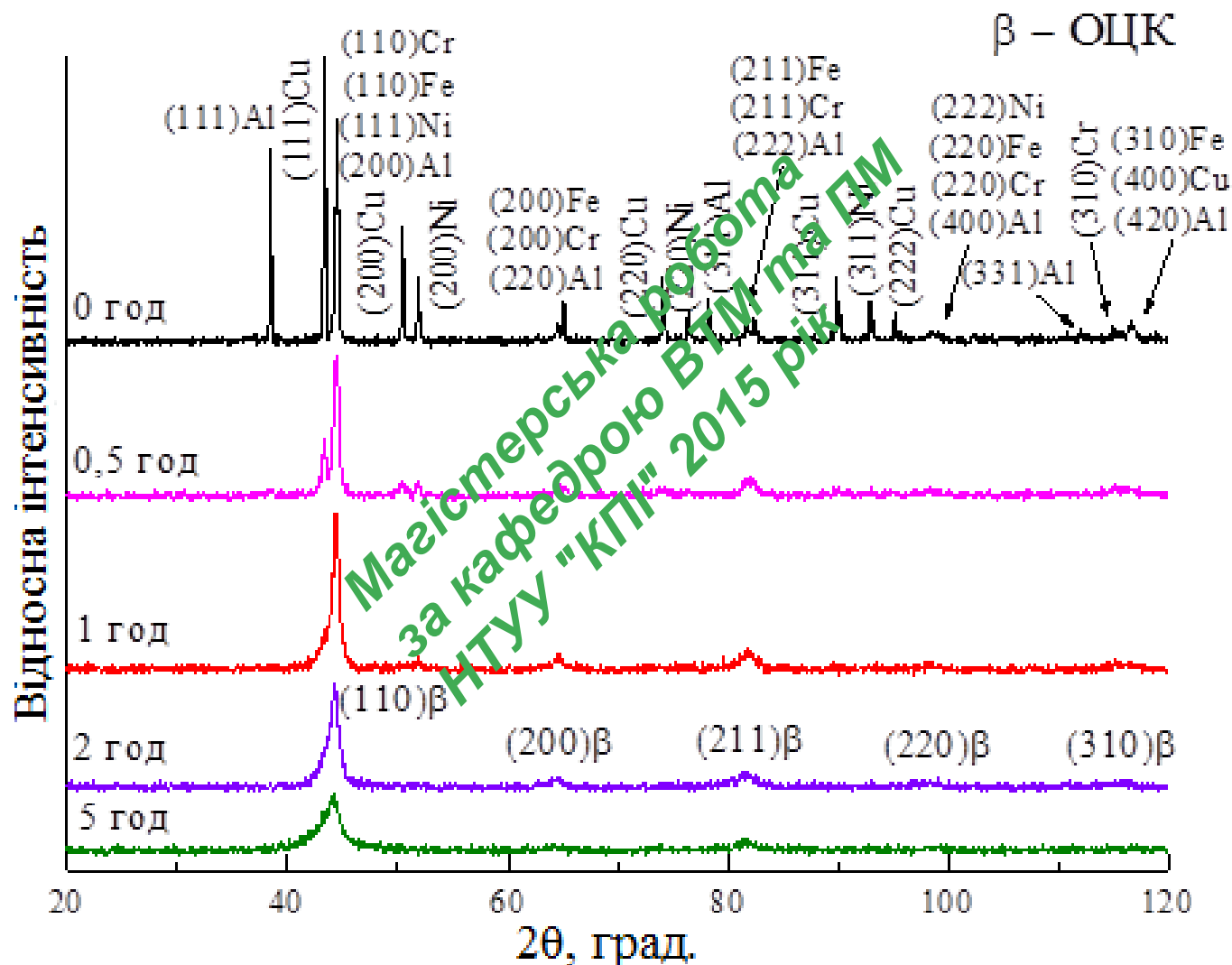
*AlCuNiFeCr після 5 год  
механічного легування*



*AlCuNiFeTi після 15 год  
механічного легування*

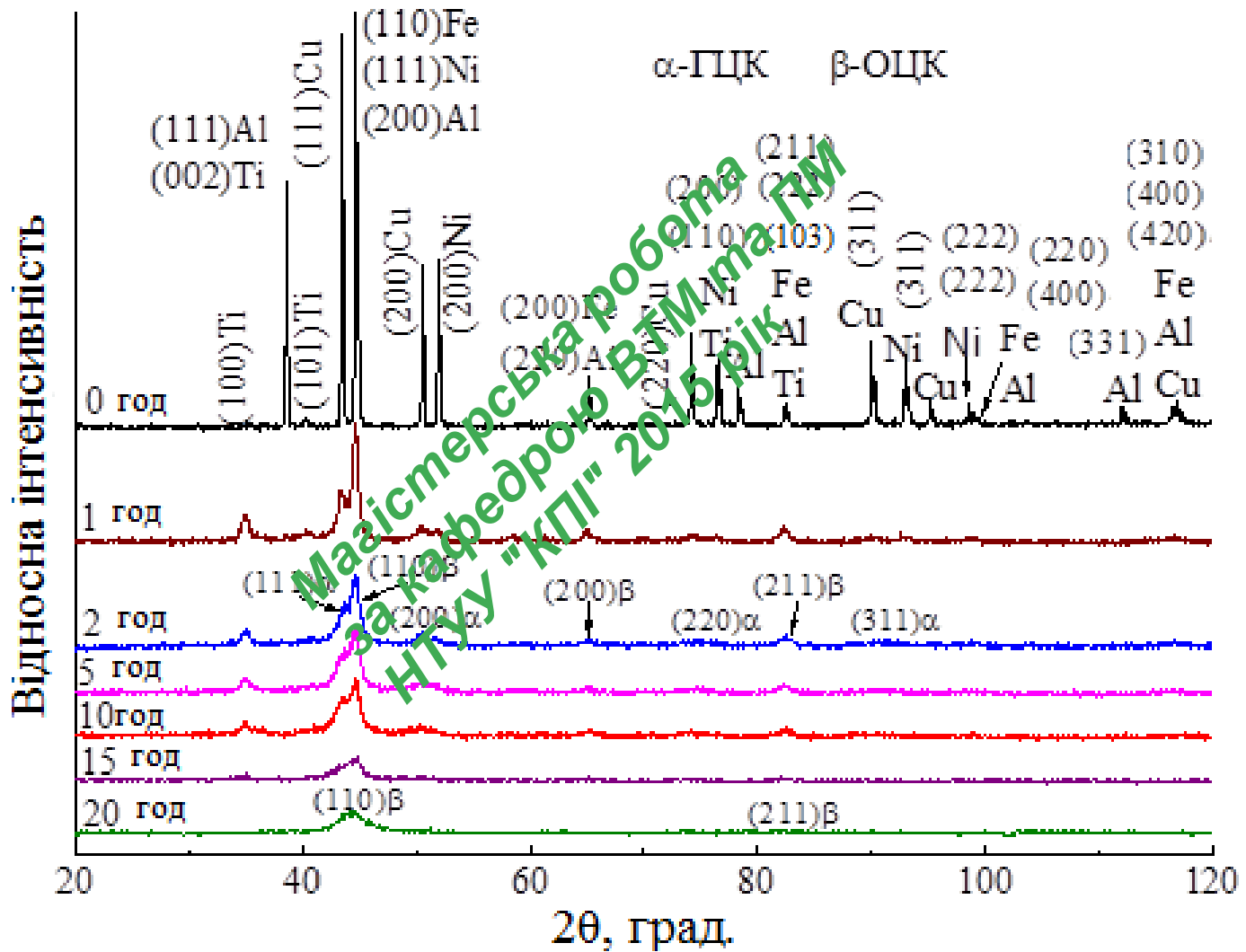
Магістерська робота  
за кафедрою ВТМ та ПМ  
НТУУ "КПІ" 2015 рік

# Спектри рентгенівської дифракції AlCuNiFeCr на різних етапах механічного легування





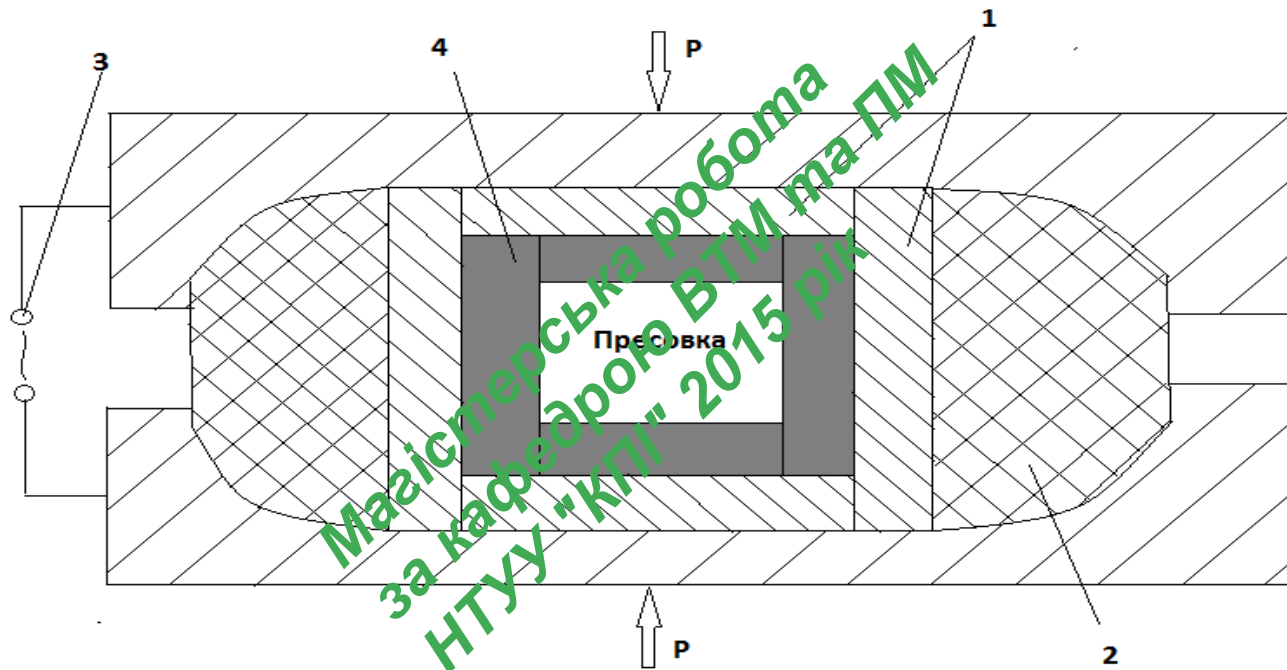
# Спектри рентгенівської дифракції AlCuNiFeTi на різних етапах механічного легування



*Визначення та порівняння теоретичного і  
розрахункового  
значення кристалічної структури AlCuNiFeCr та  
AlCuNiFeTi сплавів*

Сплав	№ лінії	$2\theta$	$\theta$	$\frac{\sin\theta}{\lambda}$	$\frac{\sin\theta}{\lambda}$	$\frac{\sin^2\theta_i}{\sin^2\theta_1}$ розрахункове	$\frac{\sin^2\theta_i}{\sin^2\theta_1}$ теоретичне <u>ОЦК-</u> <u>решітка</u>
AlCuNiFeCr	1	44,58	22,29	0,37	0,14	1	1
	2	63,9	31,95	0,52	0,28	1,94	2
	3	82,06	41,03	0,656	0,43	2,99	3
AlCuNiFeTi	1	45,46	22,73	0,39	0,15	1	1
	2	65,33	32,67	0,54	0,29	1,95	2
	3	83,95	41,98	0,67	0,45	2,99	3

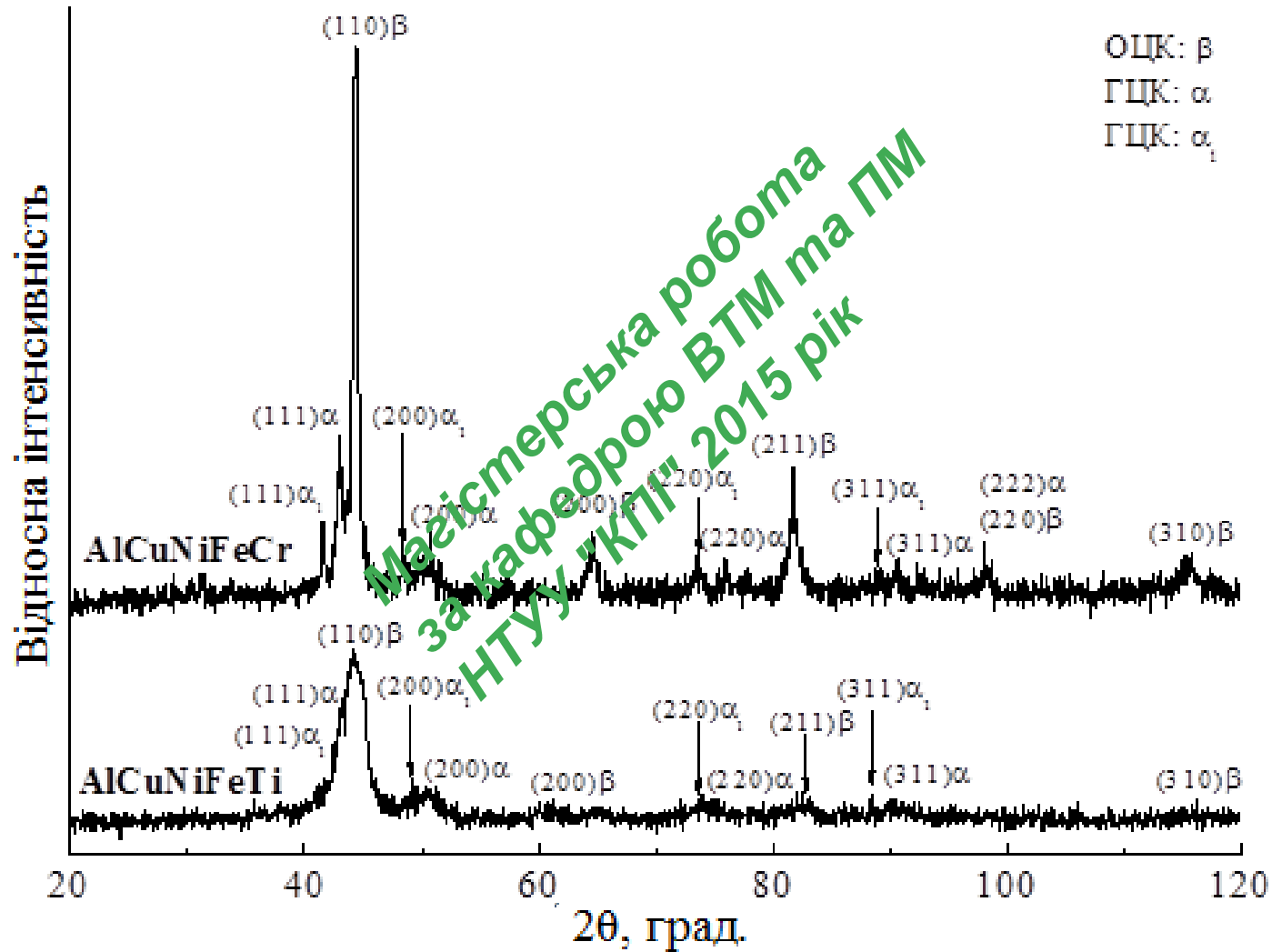
# Консолідація багатокomпонентних високоентропійних $AlCuNiFeCr$ та $AlCuNiFeTi$ сплавів



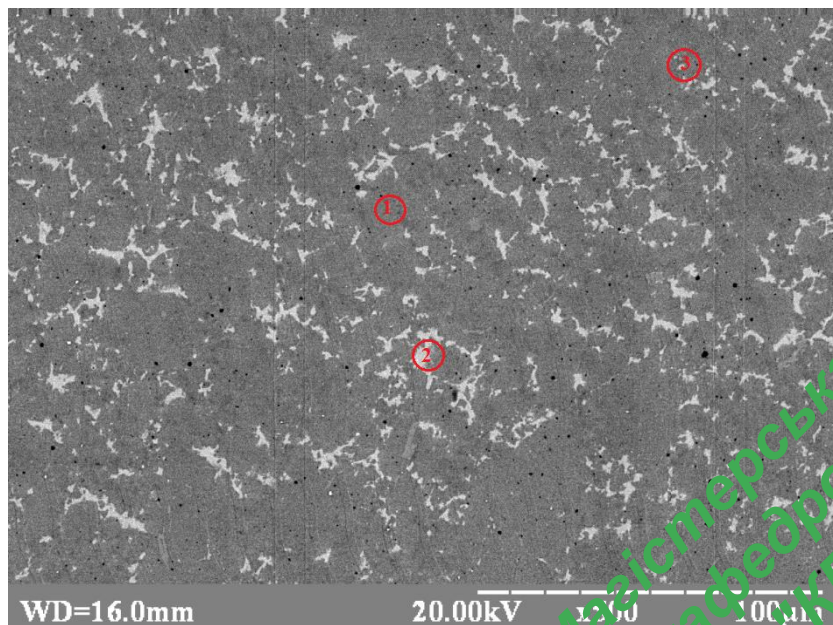
- 1 – графітовий нагрівач;
- 2 – літографський камінь;
- 3 – електрод;
- 4 – CsCl.

$P = 5$  ГПА  
 $T = 800$  °C  
 $\tau = 0,5$  год.

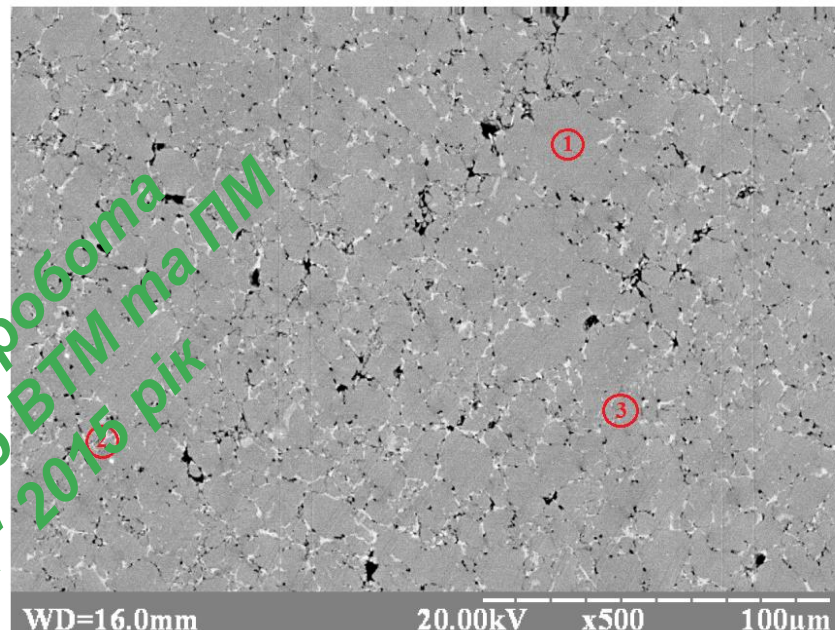
# Спектри рентгенівської дифракції AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплавів після механічного легування та після спікання під тиском



# Мікроструктура AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплавів після консолідації спіканням під тиском



AlCuNiFeCr



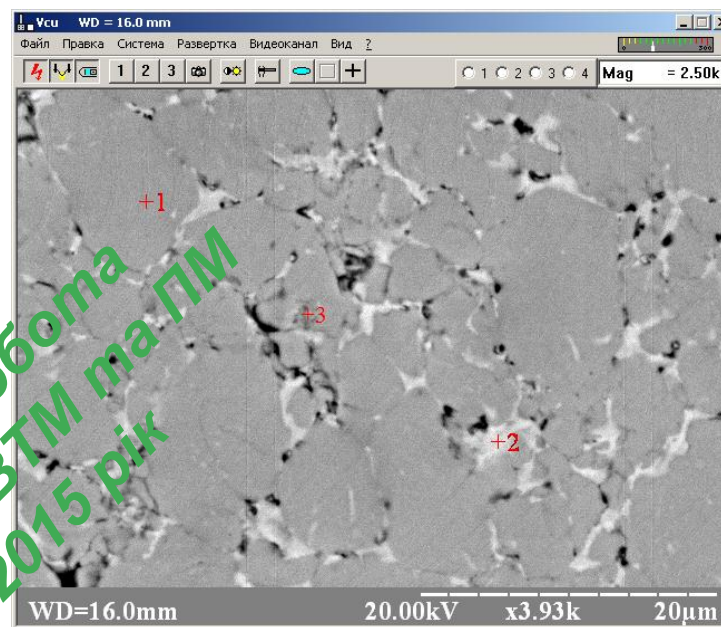
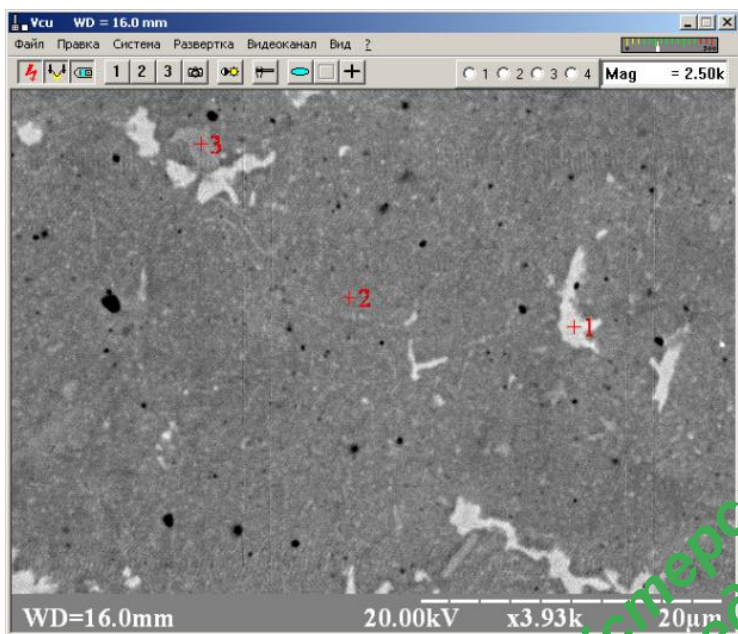
AlCuNiFeTi

Магістерська робота  
за кафедрою ВТМ та ПМ  
НТУУ «КПІ» 2015 рік

Сплав	Зона	Хімічний склад, % мас.					
		Al	Cu	Fe	Ni	Cr	Ti
AlCuNiFeCr	1	19,25	18,48	21,69	19,29	21,29	-
	2	17,27	23,62	18,05	20,51	20,55	-
	3	17,93	22,95	19,55	21,23	18,34	-

Сплав	Зона	Хімічний склад, % мас.					
		Al	Cu	Fe	Ni	Cr	Ti
AlCuNiFeTi	1	20,49	18,69	21,22	20,63	-	18,97
	2	19,23	20,07	21,48	19,77	-	19,45
	3	18,99	19,22	20,85	21,99	-	18,95

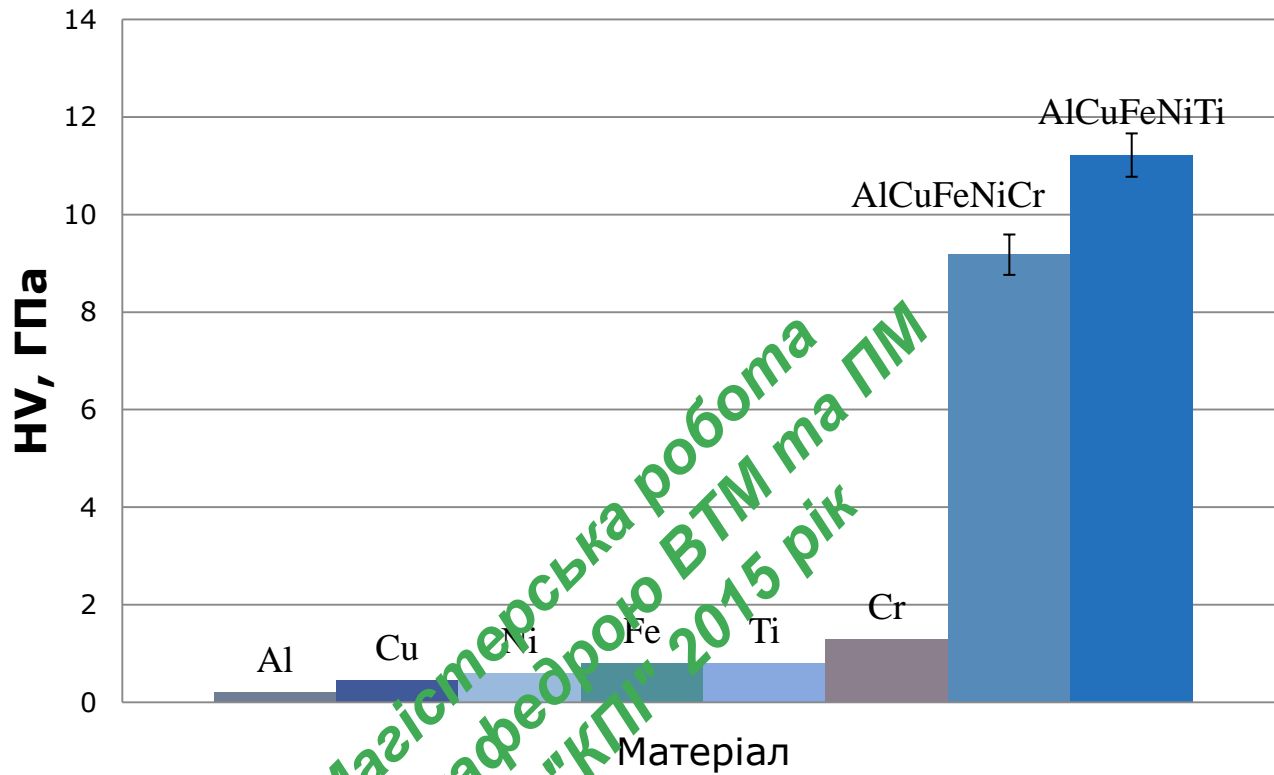
# Хімічний склад AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплавів після консолідації спіканням під тиском



Магістерська робота  
за кафедрою ВТМ та ПМ  
НТУУ "КПІ" 2015 рік

Сплав	Загальний хімічний склад, % мас.					
	Al	Cu	Fe	Ni	Cr	Ti
AlCuNiFeCr	20,94	18,24	19,51	21,08	20,23	-
<u>AlCuNiFeTi</u>	19,92	20,66	20,26	21,03	-	18,13

# Мікромеханічні випробування

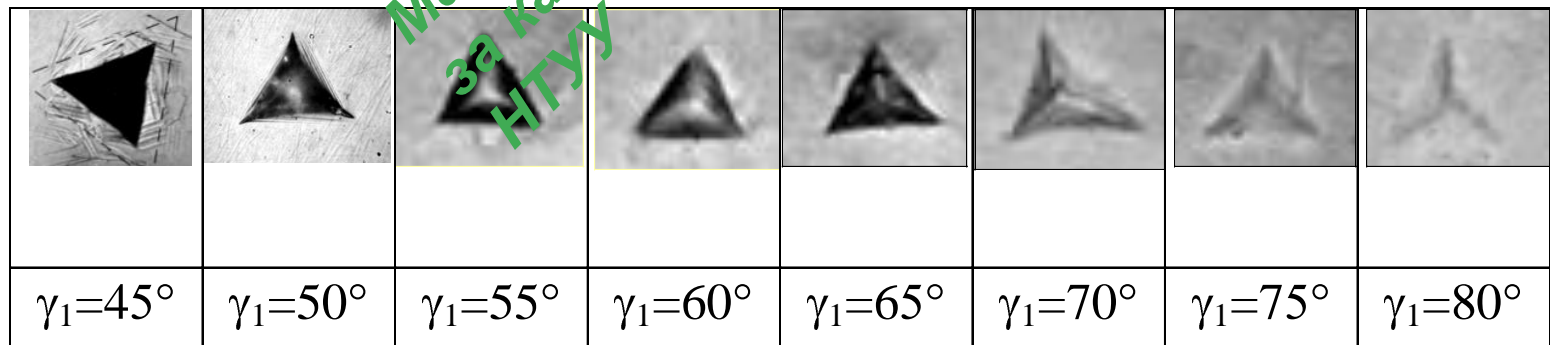


Сплав	$E$ , ГПа	$\nu$	HV, ГПа	$\delta_H$
<u>AlCuNiFeCr</u>	148	0,32	9,18	0,6
<u>AlCuNiFeTi</u>	127	0,31	11,22	0,4

## Побудова кривих «напруження-деформація» методом індентування

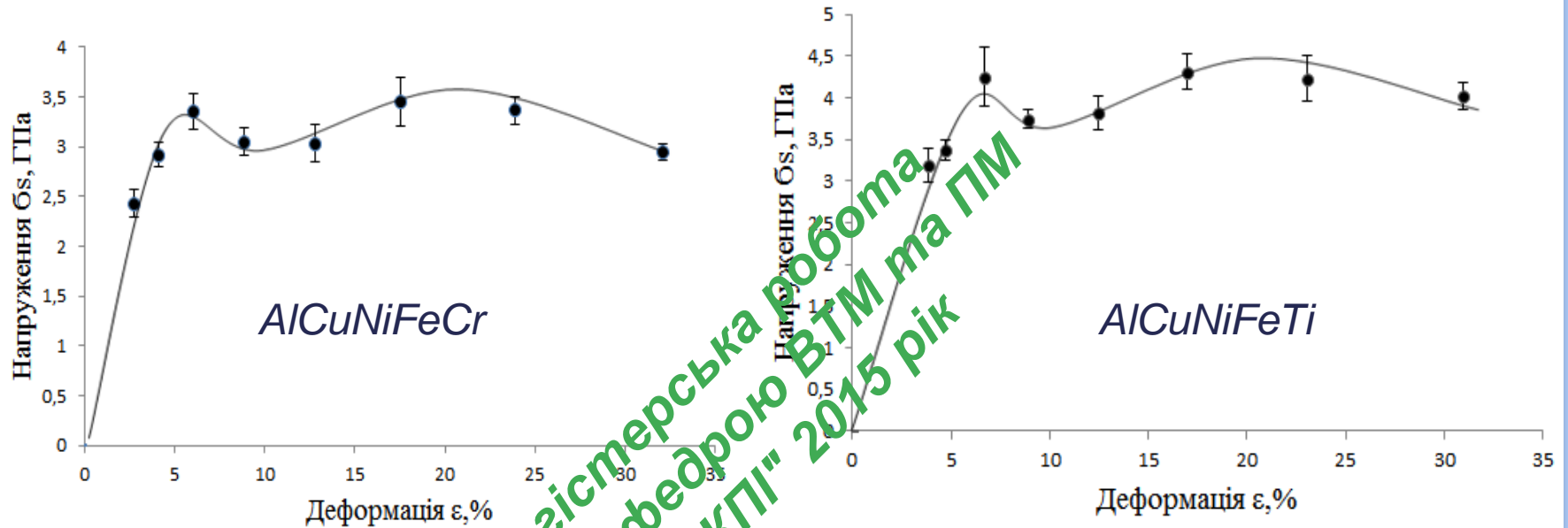
Для побудови кривих деформації « $HM - \epsilon$ » використовували набір з дев'яти тригранних алмазних пірамід з різними кутами загострення  $\gamma_1$  біля вершини, величина яких знаходиться у межах  $45 - 85^\circ$  ( $45; 50; 55; 60; 70; 75; 80; 85^\circ$ ).

Застосування кожного індентора дозволяє отримати одну точку на кривій деформації в координатах «середній контактний тиск  $HM$  – загальний ступінь деформації  $\epsilon$ ».





# Криві деформації « $\sigma - \varepsilon$ » для AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплавів



Сплав	Границя пропорційності $\sigma_e$ , ГПа	Верхня границя текучості $\sigma_s^h$ , ГПа	Нижня границя текучості $\sigma_s^l$ , ГПа
AlCuNiFeCr	2,8	3,3	2,9
AlCuNiFeTi	3,5	4,05	3,6

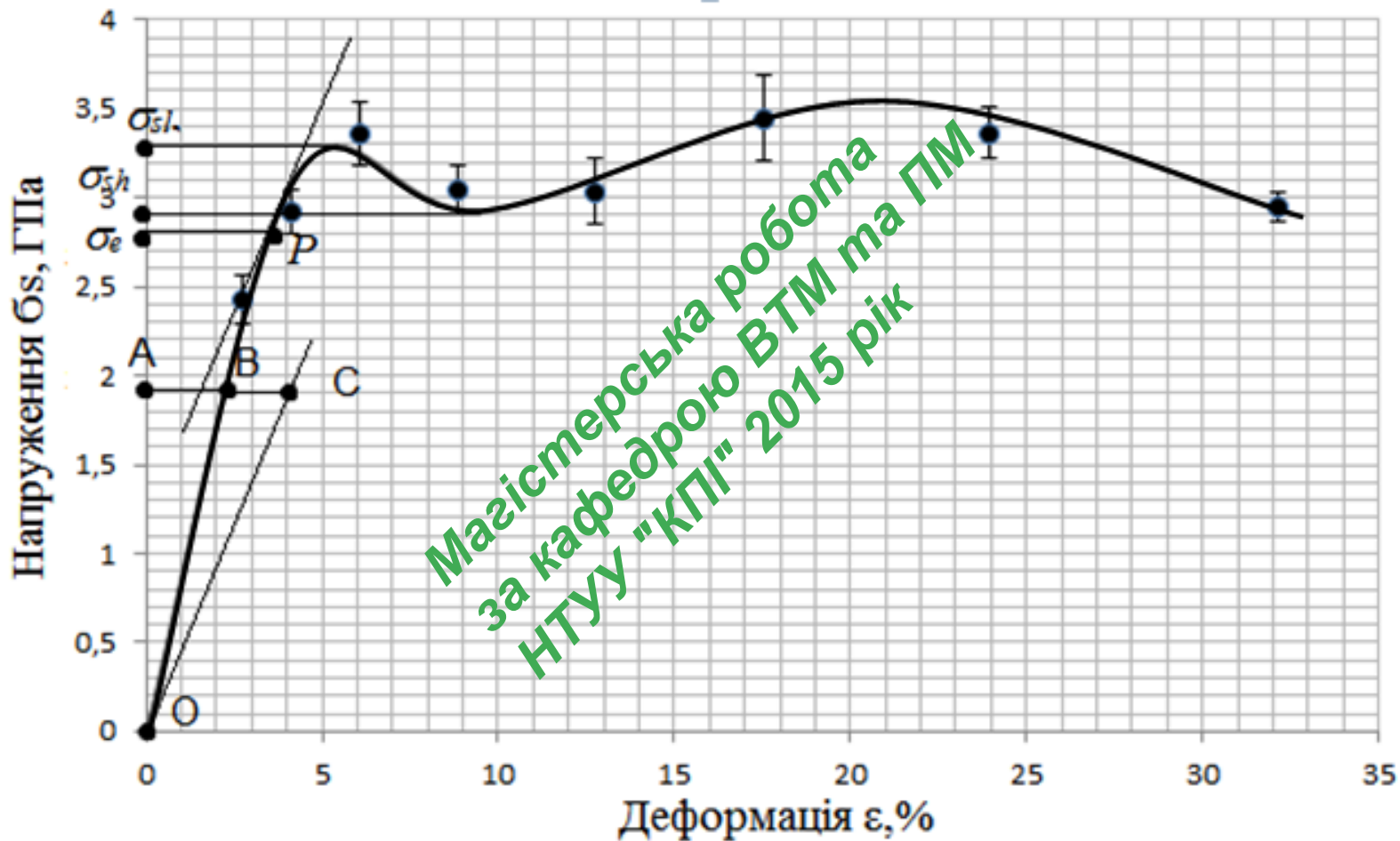
# Висновки

- В роботі методом механічного легування у планетарному млині отримано багатокomпонентні високоентропійні AlCuNiFeCr та AlCuNiFeCrTi сплави.
- Встановлено, що обидва сплави після МЛ складаються з ОЦК-твердого розчину з нанокристалічною структурою. Висока ентропія змішування зменшує вільну енергію Гіббса екватомних п'ятикомпонентних AlCuNiFeCr та AlCuNiFeCrTi сплавів, сприяє зменшенню тенденцію до впорядкованості та сегрегації, полегшує формування твердого розчину та збільшує його стабільність в порівнянні з інтерметалідами та іншими впорядкованими фазами.
- Після спікання під тиском 5 ГПа при температурі 800°C протягом 0,5 годин сплави мають трьохфазну структуру, що складається в основному з ОЦК-твердого розчину заміщення та невеликої кількості двох ГЦК та ГЦК1-твердих розчинів. При цьому структура AlCuNiFeTi сплаву залишається нанокристалічною, що свідчить про його більш високу термодинамічну стабільність в порівнянні зі сплавом AlCuNiFeCr.
- Мікрорентгеноспектральний аналіз підтвердив однорідність хімічного складу консолідованих AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплавів. Концентраційне відхилення кожного елемента у сплавах не перевищує 2,5 ат.% від номінального вмісту
- Результати мікромеханічних випробувань засвідчили високий рівень характеристик міцності AlCuNiFeCr та AlCuNiFeTi сплавів: мікротвердість HV складає  $9,2 \pm 0,4$  і  $11,2 \pm 0,6$  ГПа; границя пропорційності (пружності)  $\sigma_e$  складає 2,8 та 3,5 ГПа; верхня границя текучості  $\sigma_s^h$  складає 3,3 та 4,05 ГПа; а нижня границя текучості  $\sigma_s^l$  – 2,9 та 3,6 ГПа, відповідно. Високі характеристики міцності забезпечуються ефектами твердорозчинного та наноструктурного зміцнення. При цьому присутність Ti у сплаві значно підвищує його механічні характеристики.

**Дякую за увагу!**

Магістерська робота  
за кафедрою ВТМ та ПМ  
НТУУ "КПІ" 2015 рік

Визначення механічних характеристик за кривою деформації « $\sigma - \epsilon$ » для AlCuNiFeCr сплаву



Визначення механічних характеристик за кривою деформації « $\sigma - \epsilon$ » для AlCuNiFeTi сплаву

