



“Магнітоіндукована анізотропія в магнітоактивних еластомерах”



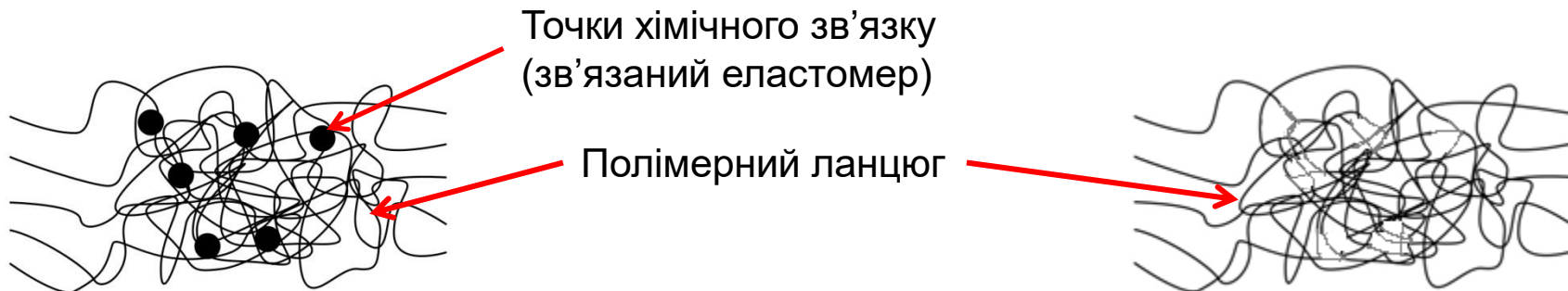
Andrii V. Bodnaruk¹, Viktor M. Kalita¹, Mykola M. Kulyk¹, Sergey M. Ryabchenko¹, Mikhail Shamonin², Alexander Brunhuber²

¹Institute of Physics NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

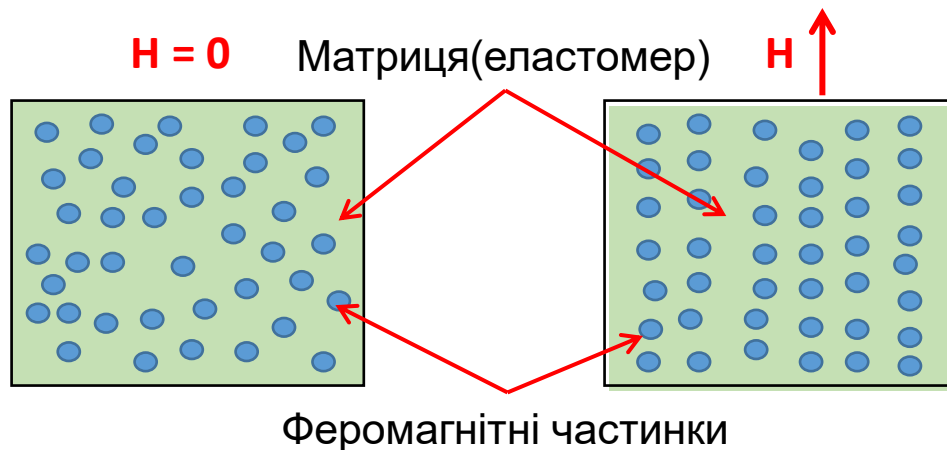
*²East Bavarian Centre for Intelligent Materials
(EBACIM), Regensburg, Germany*

Що таке магнітоактивні еластомери?

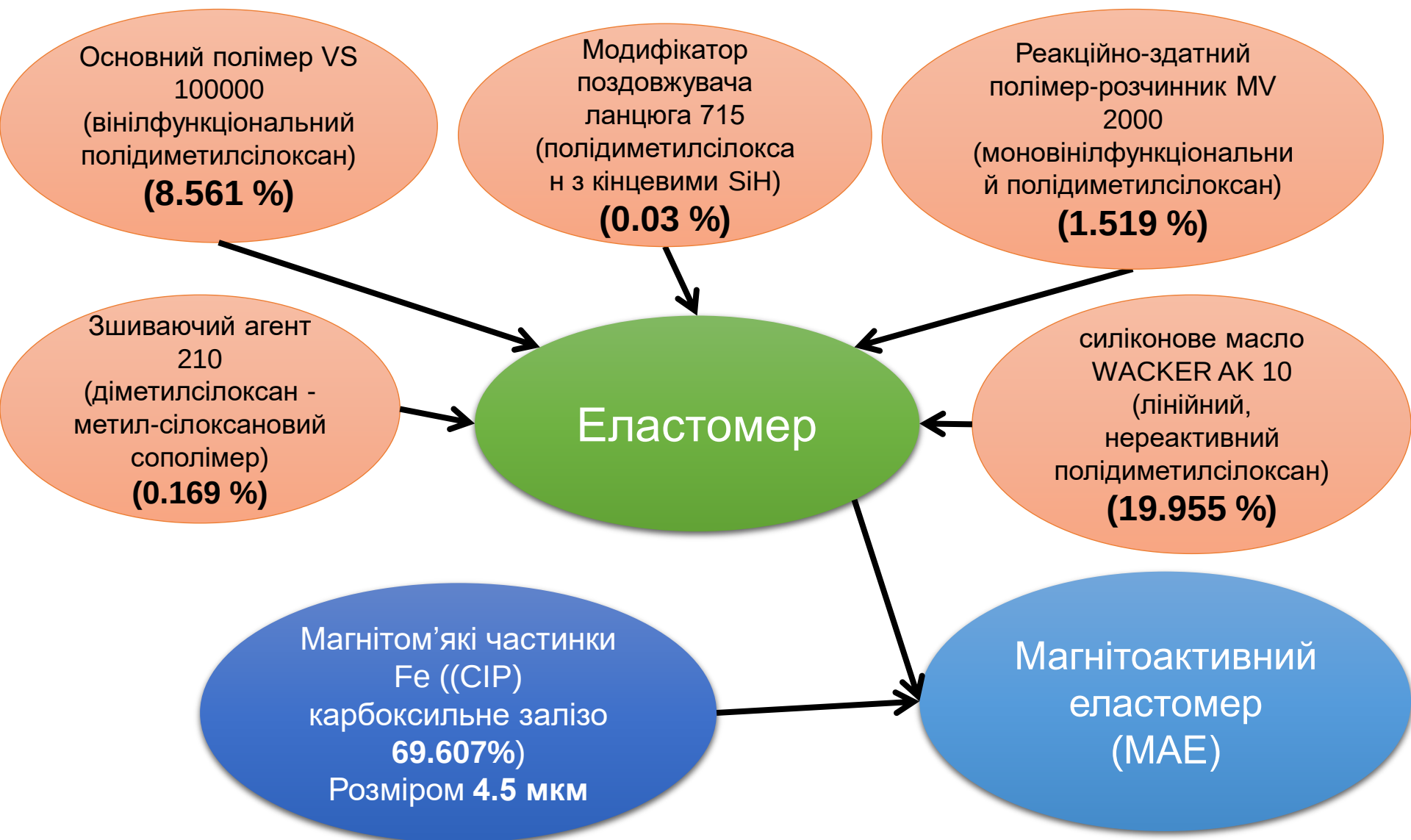
Еластомери - полімери з високоеластичними властивостями у широкому температурному діапазоні.



Магнітоактивні еластомери (МАН) – це композитний матеріал, який складається з магнітних частинок (мікро або нано), які поміщені в немагнітну матрицю (еластомер).

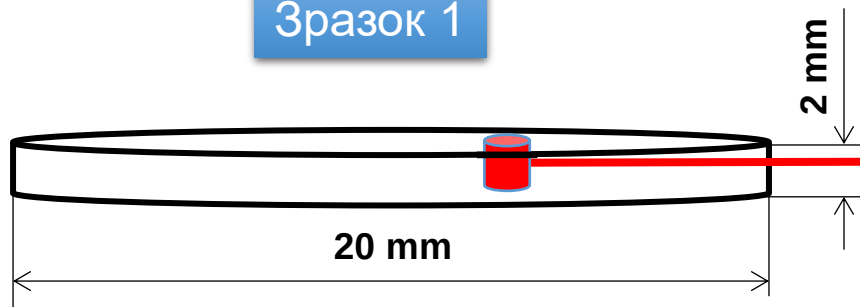


Зразки МАЕ (PDMS - Полідиметилсілоксан) було отримано в Реґенсбурзі в Східно-баварській вищій технічній школі (OTH) професором M. Shamonin та A. Brunhuber.

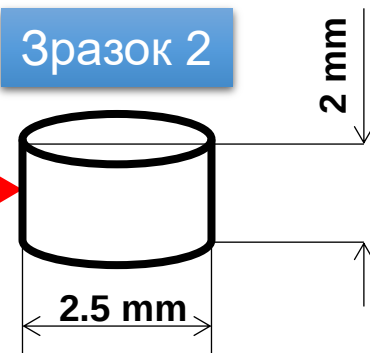


Зразки, що досліджувались

Зразок 1

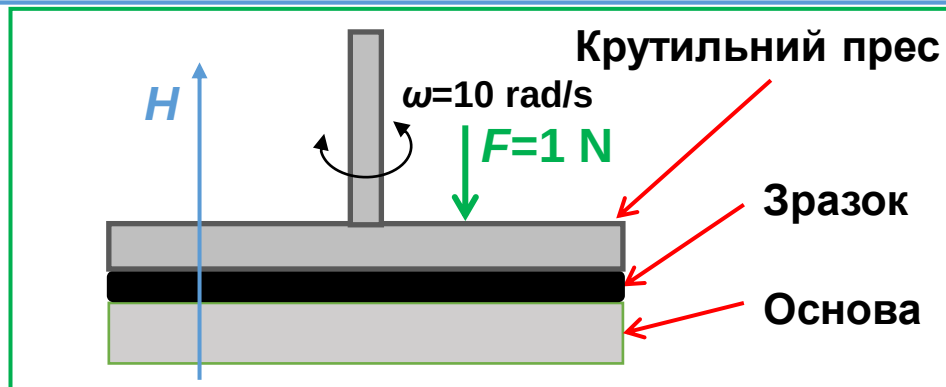


Зразок 2



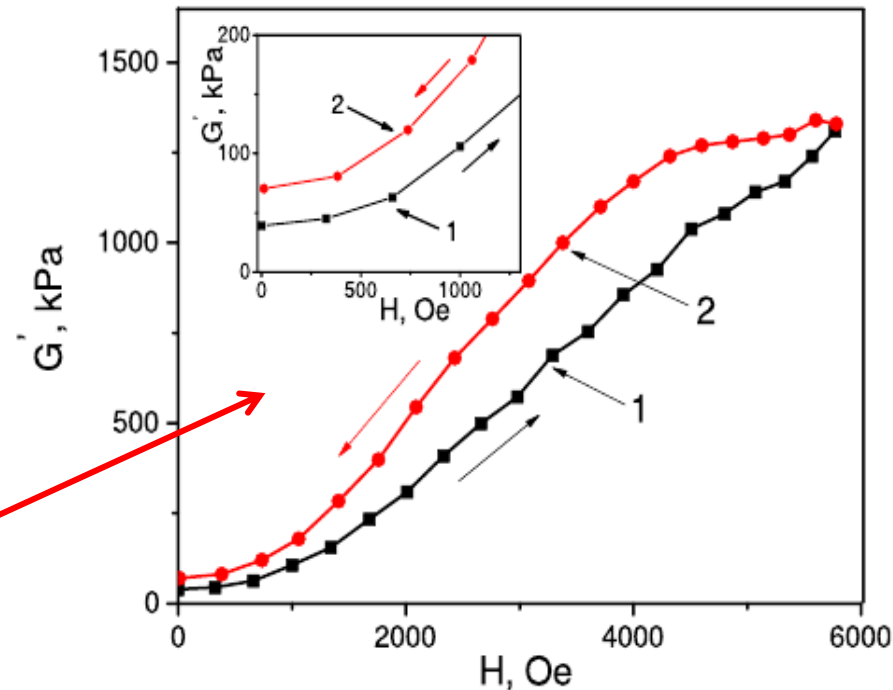
Зразок 1 для вимірювання залежності модуля пружності від величини прикладеного магнітного поля.

Зразок 2 поміщався в жорсткий кювет для магнітостатичних вимірювань на вібраційному магнетометрі.



Польова залежність модуля пружності G . Крива 1 - зростання поля, крива 2 зменшення поля. На вставці - залежність у малих полях.

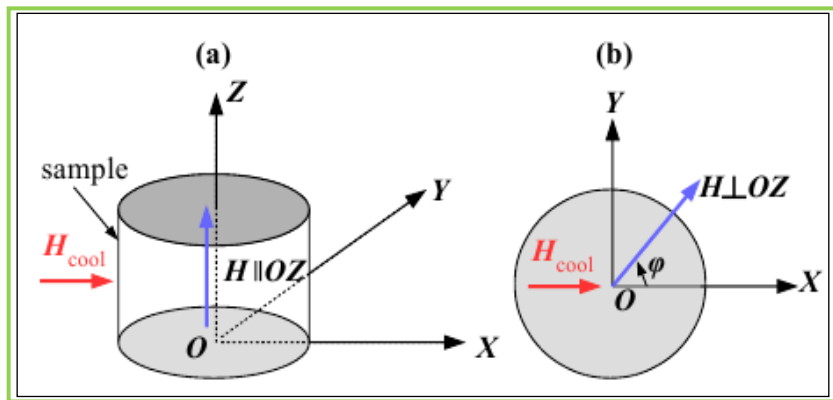
$$G' = 4 \cdot 10^4 \text{ Па} (1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3})$$



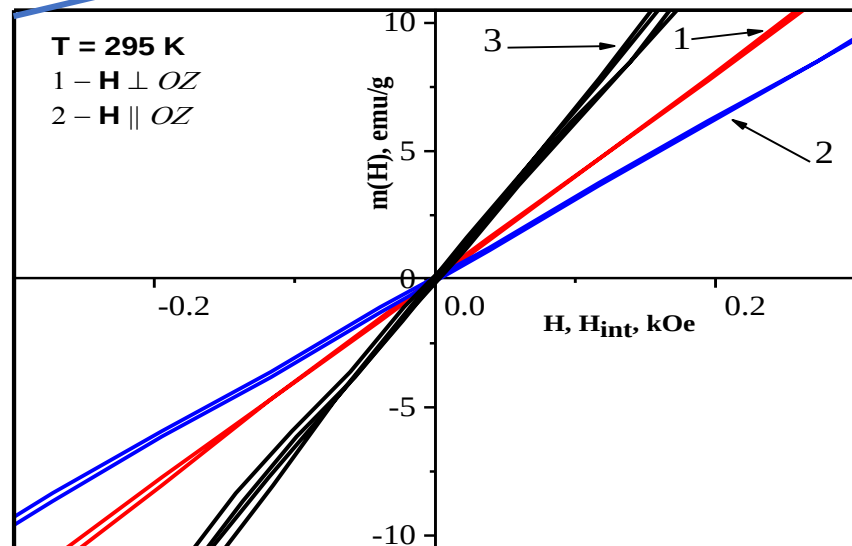
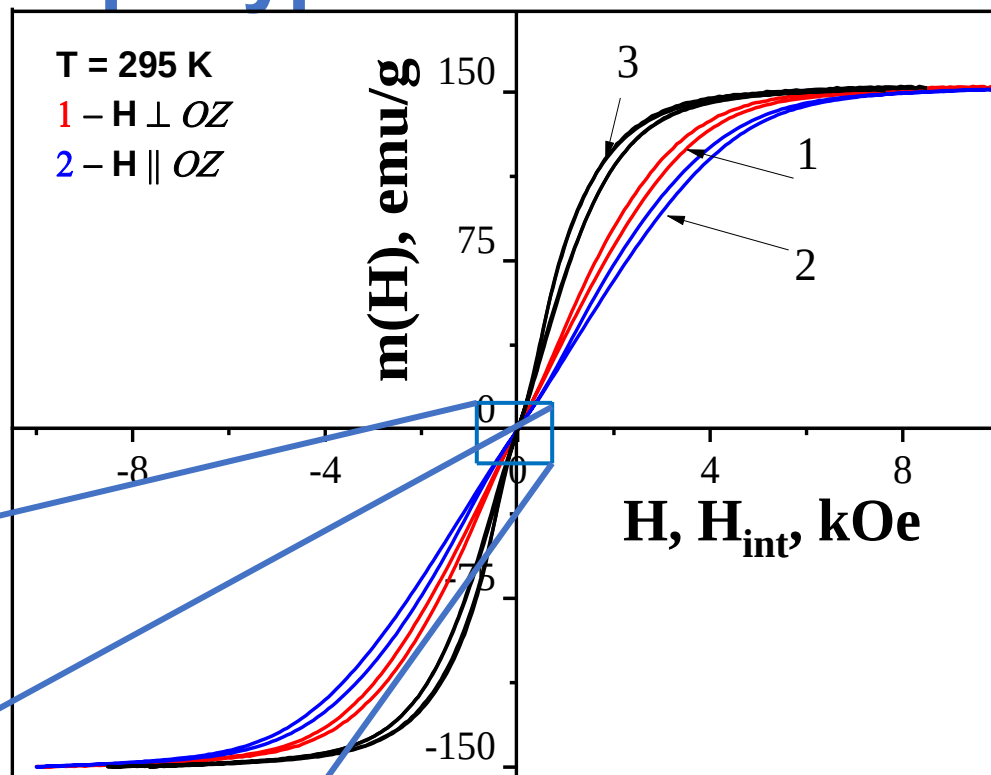


Намагнічування за кімнатної температури

5



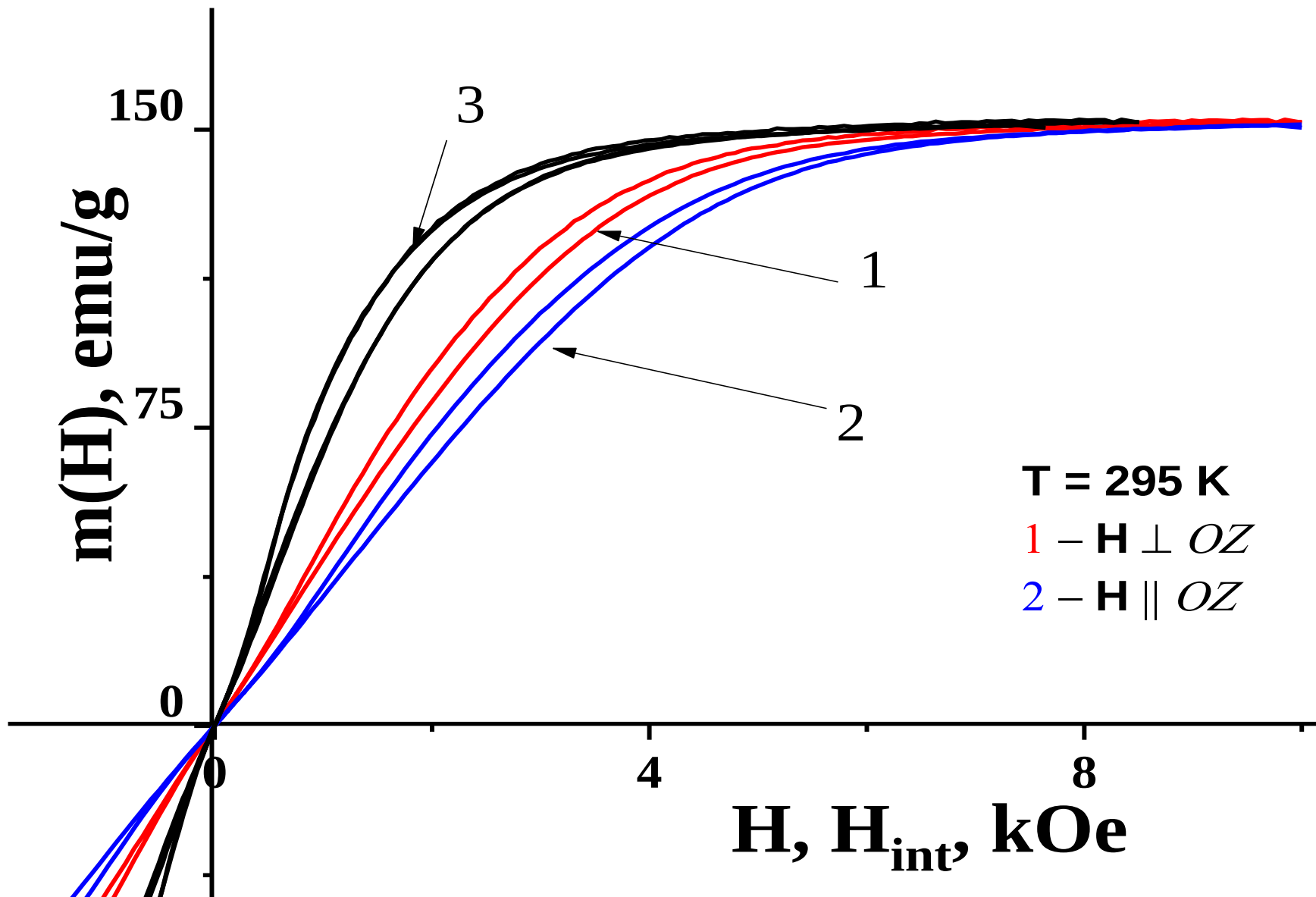
(а) Орієнтація зразка в полі охолодження H_{cool} і вимірювальному полі $H \parallel OZ$.
(б) $H \perp OZ$.



Крива 1 – $H \perp OZ$. Крива 2 – $H \parallel OZ$.
Крива 3 – перерахована від внутрішнього поля H_{int} . Залежність намагніченості МАЕ від внутрішнього поля отримано за допомогою формули: $H_{int} = H - N_{\parallel} m_V \phi_V$, де $N_{\parallel} + 2N_{\perp} = 4\pi$, $m_V = \rho_V m(H) / \phi_V$. $\rho_V = 2.5 \text{ г/см}^3$, $\phi_V = 25\%$.



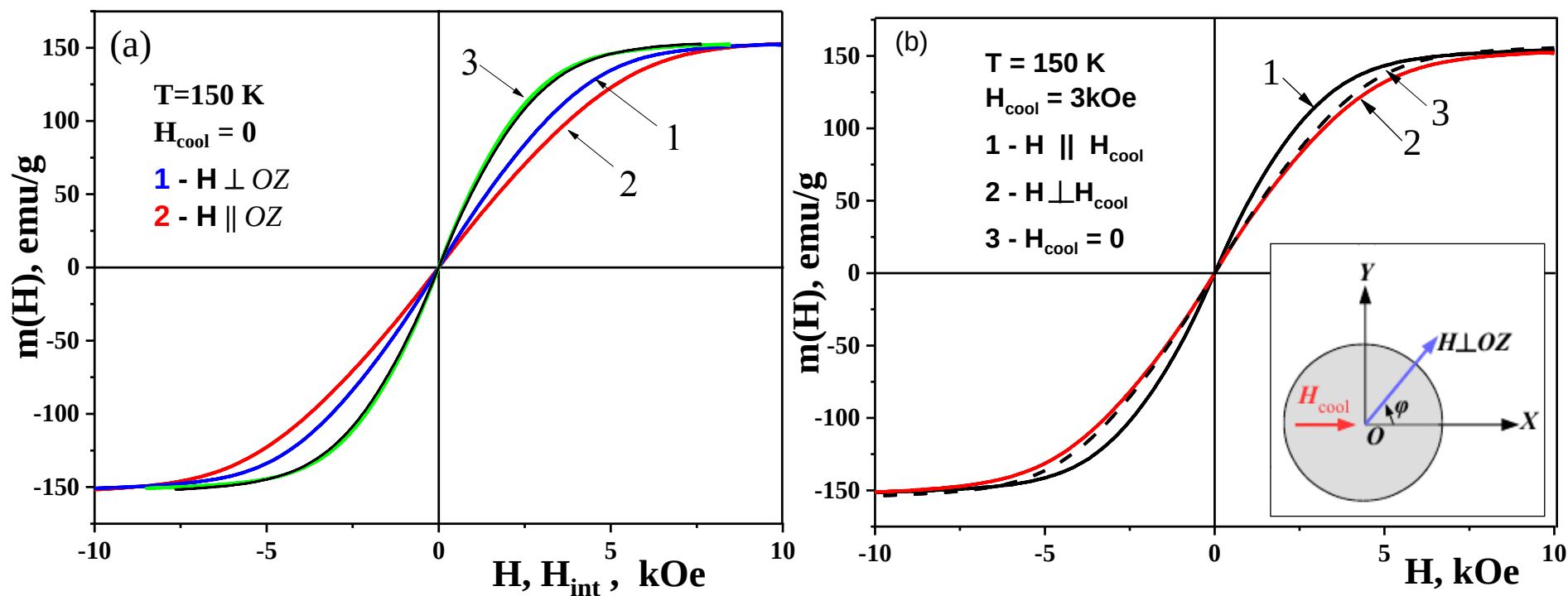
«Защемленный» гистерезис





Намагнічування за низьких температур

7



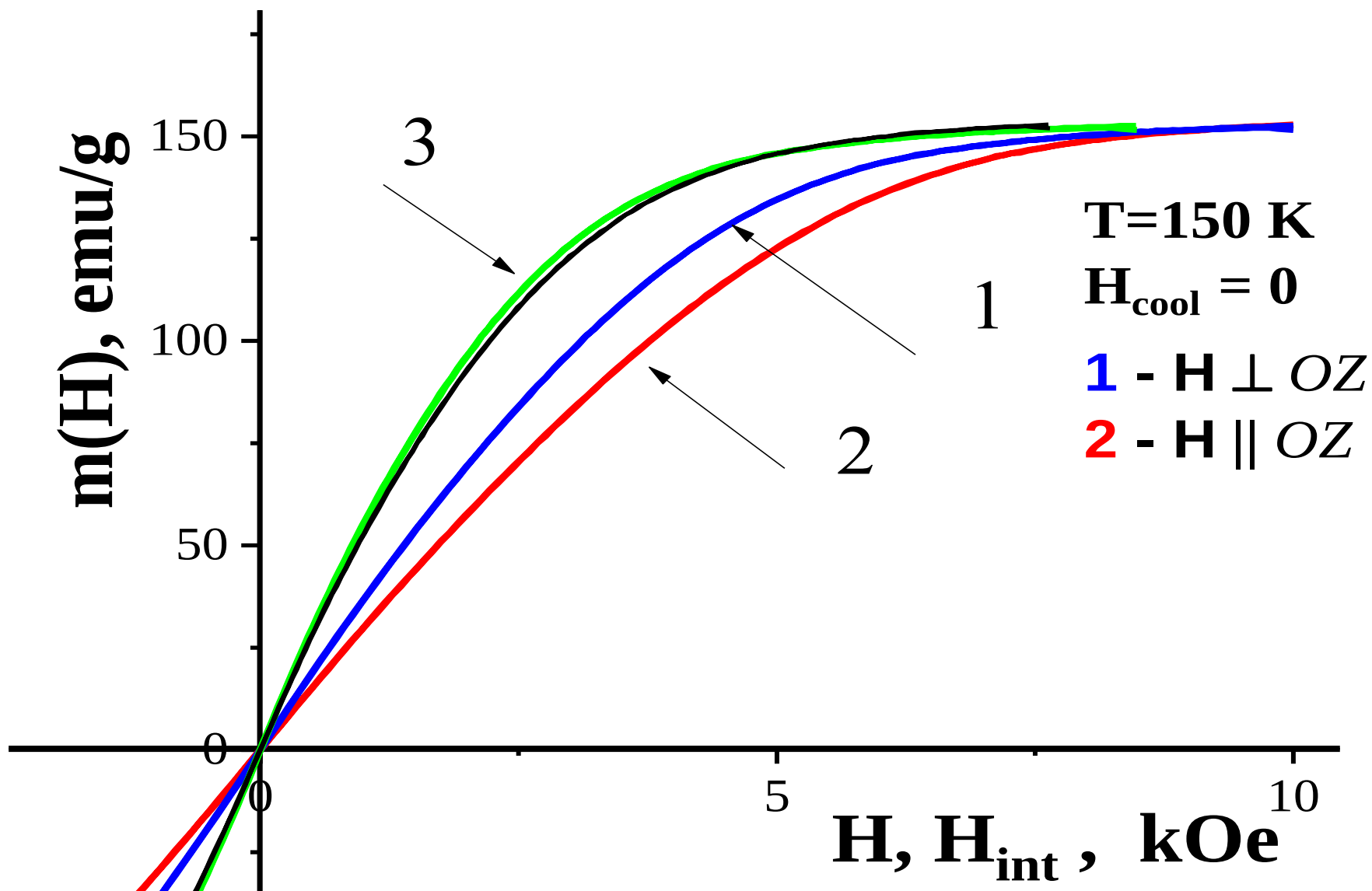
Залежності намагніченості зразка МАЕ за $T=150\text{ K}$.

(a) – охолодженого без магнітного поля $H_{cool} = 0$, крива - 1 отримана в магнітному полі $H \perp OZ$, крива - 2 в магнітному полі $H \parallel OZ$, криві 3 – це залежності $m(H_{int})$ для кривих 1 і 2, побудовані від внутрішнього магнітного поля (H_{int});

(b) – охолодженого в полі $H_{cool} = 3\text{ kOe}$, крива - 1 отримана в $H \parallel H_{cool}$, крива 2 – в $H \perp H_{cool}$, крива 3 - $H_{cool} = 0$.

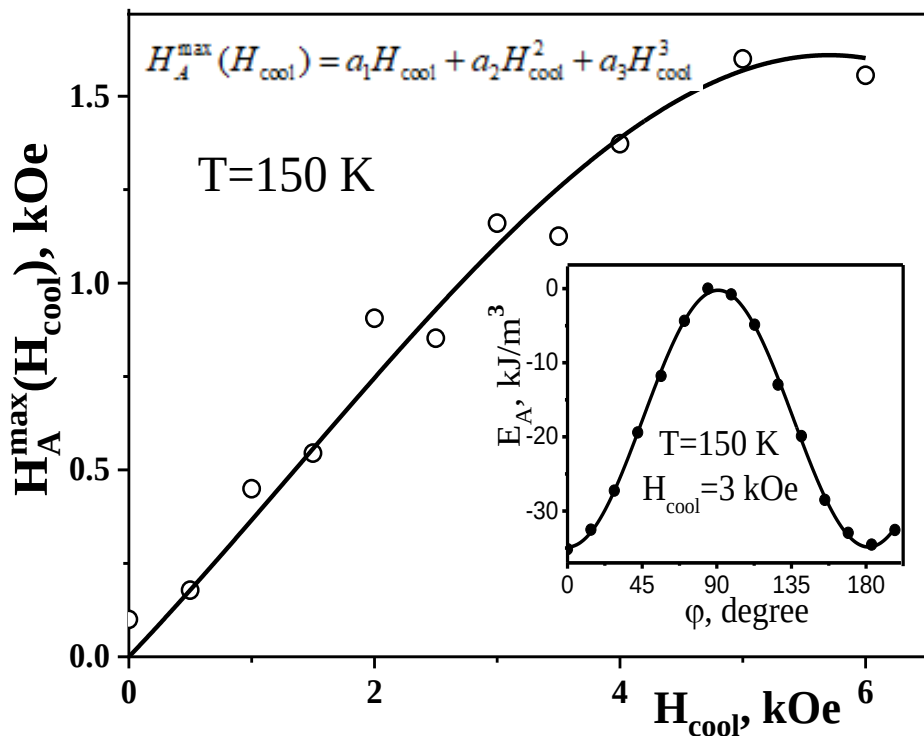


Криві перемангнічування за $T = 150$ K





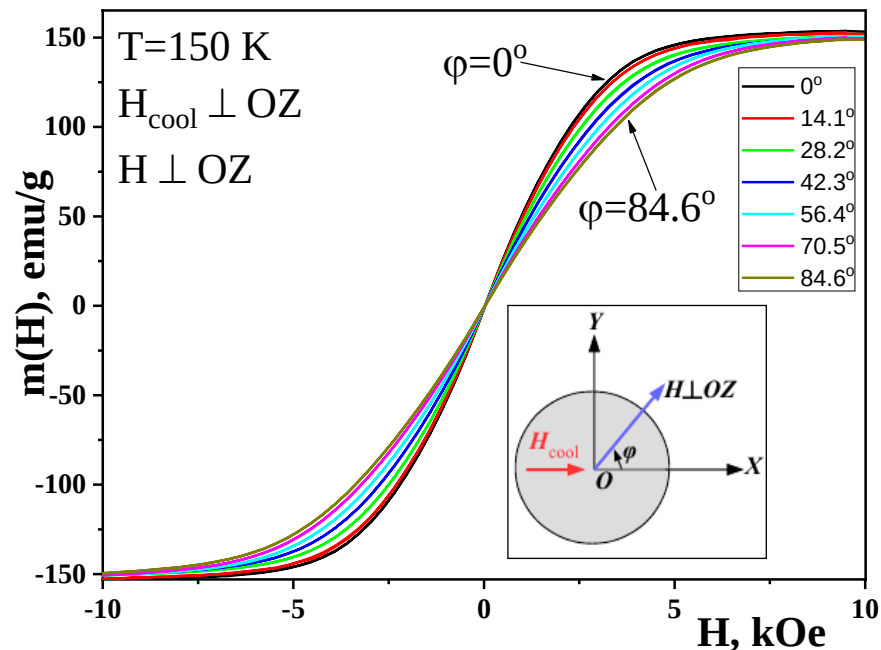
Залежність величини індукованої анізотропії від прикладеного поля



Залежність величини наведеного поля анізотропії $H_A(H_{\text{cool}})$ від величини прикладеного магнітного поля H_{cool} в якому охолоджувався зразок до $T=150 \text{ K}$.

На вставці – залежність енергії анізотропії $E_A(\phi)$, виміряна для $H_{\text{cool}} = 3 \text{ kOe}$. Суцільною лінією – апроксимація залежності $E_A(\phi)$, формулою $E_A(\phi) = -\frac{1}{2} K_{ef} \cos^2 \phi$, де K_{ef} - ефективна константа наведеної за $H_{\text{cool}} = 3 \text{ kOe}$, одноосної анізотропії МАЕ.

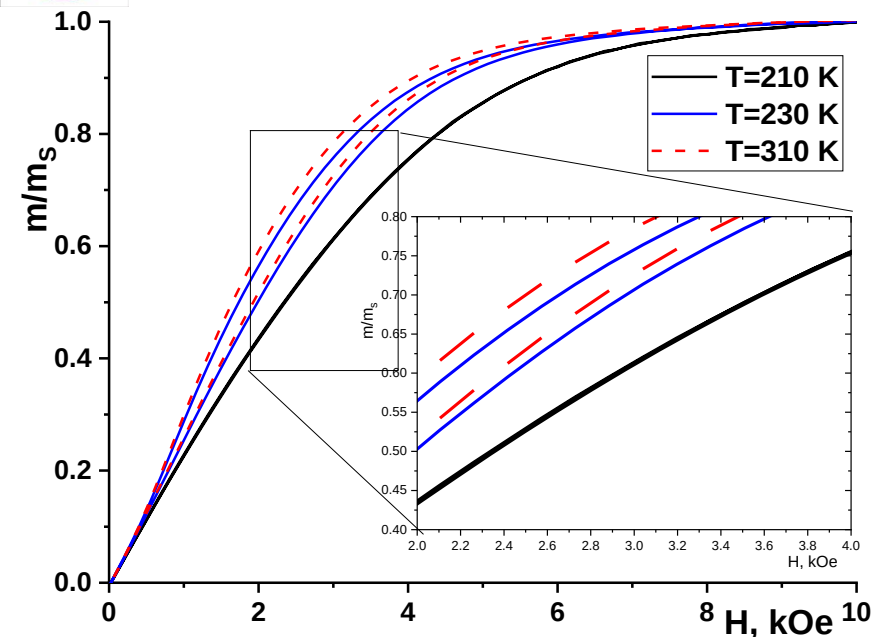
$$K_{ef} = 7 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3.$$



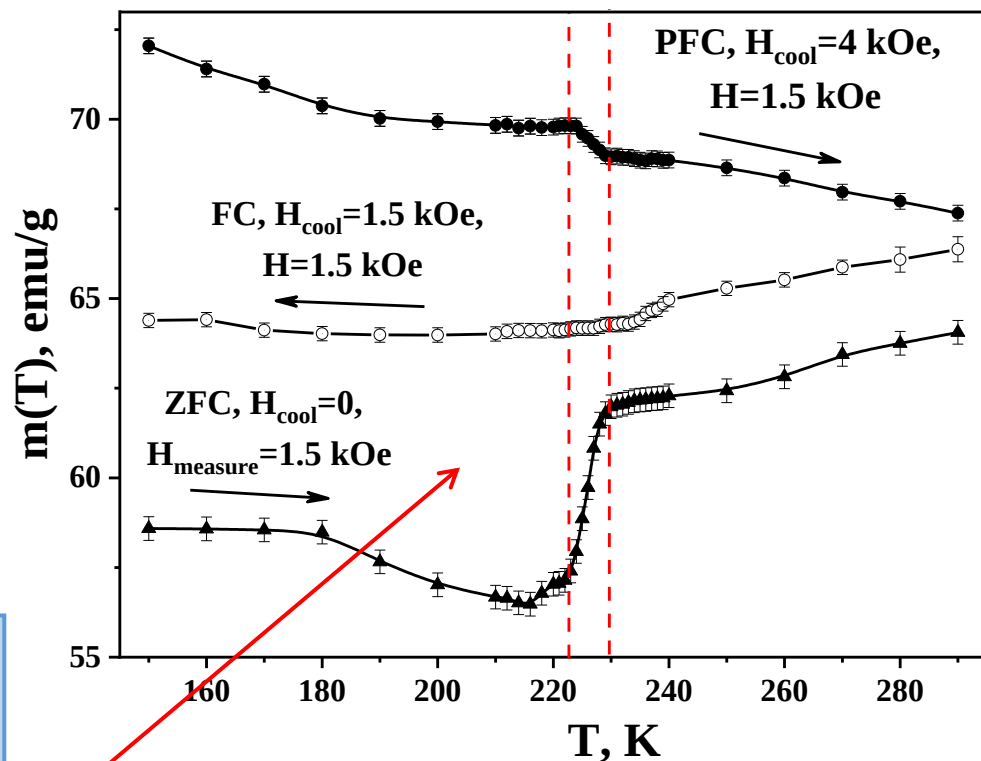
Польові залежності намагніченості $m(H)$ зразка МАЕ охолодженого в полі $H_{\text{cool}} = 5 \text{ kOe}$ до температури $T = 150 \text{ K}$.



Намагнічування за низьких температур¹⁰



Польові залежності нормованої намагніченості $m(H)/m_s$ для температур – $T=210$ К, $T=230$ К та $T=310$ К.



Під час **ZFC (zero-field-cooled)** вимірювань. МАЕ охолоджували за відсутності магнітного поля ($H_{cool} = 0$) до $T=150$ К. Температурна залежність намагніченості вимірювалася в магнітному полі $H \perp OZ$ рівному $H = 1.5$ kOe.

Під час **PFC (positive-field-cooled)** вимірювань, зразок охолоджували в полі $H_{cool} \perp OZ$ і рівному $H_{cool} = 4$ kOe, а температурна залежність намагніченості, вимірювалася під час нагрівання зразка МАЕ до $T=295$ К, в полі $H = 1.5$ kOe, $H \parallel H_{cool}$.

Під час **FC (field-cooled)** вимірювали намагніченість зразка МАЕ, охолоджуючи його до $T=150$ К, в полі $OZ \perp H_{cool} = 1.5$ kOe.



- Встановлено, що за низьких температур(нижче температури солідіфікації) модуль пружності матриці еластомеру PDMS значно зростає. За низьких температур феромагнітні частинки наповнювача еластомеру, не можуть зміщуватись(рухатись) одна відносно одної під час намагнічування, в результаті частинки є «заблокованими» і відсутній гістерезис в ненульовому магнітному полі.
- З підвищенням температури величина модуля пружності матриці еластомеру зменшується в певному діапазоні температур (220 K - 230 K для досліджуваного зразка МАЕ). Частинки розблоковуються для відносних переміщень під впливом магнітних сил. Це розблокування супроводжується появою магнітного гістерезису в ненульових полях. Форма цих петель істотно не змінюється до кімнатної температури.
- Експериментально виявлена «оборотна» магнітна анізотропія, індукована зовнішнім магнітним полем. Термін "оборотний" означає, що за кімнатної температури магнітна анізотропія відсутня коли зовнішнє магнітне поле рівне нулю. Анізотропія в МАЕ досягається шляхом заморожування зразка в ненульовому магнітному полі.

За результатами дослідження опубліковано наступні статті:

- Andrii V. Bodnaruk, Alexander Brunhuber, Viktor M. Kalita, Mykola M. Kulyk, Andrei A. Snarskii, Albert F. Lozenko, Sergey M. Ryabchenko, and Mikhail Shamonin. «**Temperature-Dependent Magnetic Properties of a Magnetoactive Elastomer: Immobilization of the Soft-Magnetic Filler**». ***Journal of Applied Physics*** 123, issue 11 (21.03.2018): 115 -118. <https://doi.org/10.1063/1.5023891>.
- Andrii V. Bodnaruk, Alexander Brunhuber, Viktor M. Kalita, Mykola M. Kulyk, Peter Kurzweil, Andrei A. Snarskii, Albert F. Lozenko, Sergey M. Ryabchenko, и Mikhail Shamonin. «**Magnetic Anisotropy in Magnetoactive Elastomers, Enabled by Matrix Elasticity**». ***Polymer*** 162 (01. 2019): 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.12.027>.
- Andrii V. Bodnaruk, Viktor M. Kalita, Mykola M. Kulyk, Albert F. Lozenko, Sergey M. Ryabchenko, Andrei A. Snarskii, Alexander Brunhuber, and Mikhail Shamonin. «**Temperature Blocking and Magnetization of Magnetoactive Elastomers**». ***Journal of Magnetism and Magnetic Materials*** 471 (02.2019): 464–67. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.005>.

Дякую за увагу!