



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАГНИТОСТРИКЦИИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Е. Д. Сербин\*, В. Н. Перов\*\*, В. Н. Костин

1 – Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

\* - serbin@imp.uran.ru; \*\* - perovadim22@gmail.com

**Аннотация.** Величина магнитоэлектрической ферромагнитного материала в существенной степени определяет эффективность электромагнито-акустического преобразования и интенсивность магнитоакустической эмиссии, которые основаны на приложении переменных магнитных полей. Показано, что в переменном магнитном поле возможно измерение динамических магнитоэлектрических характеристик с помощью лазерной интерферометрии. Экспериментально установлено, что определяемая по амплитуде второй гармоники упругих колебаний ферромагнетиков динамическая магнитоэлектрическая чувствительность коррелирует с величиной максимального магнитоэлектрического удлинения исследованных ферромагнитных материалов.

**Образцы**

Была выбрана группа ферромагнитных материалов с различными магнитными и магнитоэлектрическими характеристиками. Размеры образцов после обработки составили  $3.8 \times 6.1 \times 86.2$  мм.

В таблице приведены магнитные свойства исследуемых образцов из ферромагнитных материалов.

Материал	$H_c$ , А/м	$M_S$ , А/см	$\mu_a$	$\mu_{max}$	$b_0$ , м/А	$\lambda^+_{max}$ , $10^{-6}$	$\lambda_S$ , $10^{-6}$
Сталь 9ХФ	1 980	13 800	37	210	0,022	0,4	-1,8
Сталь 75Г	780	15 700	66	460	0,14	0,8	-6,6
Сталь 30ХГСА	750	15 860	92	490	0,39	2,1	-1,2
Сталь 09Г2	280	16 300	110	1300	3,3	2,7	-4,5
Армко-Fe	85	17 300	270	2800	14,0	4,1	-12
Пермендюр	129	18 650	450	1400	0,83	–	58
Никель	350	4930	102	540	0,57	–	-35

**Методика измерений**

Кривые намагничивания и предельные петли гистерезиса образцов были измерены в замкнутой цепи с помощью измерительного комплекса REMAGRAPH C-500.

Измерение полевых зависимостей магнитоэлектрики  $\lambda(H)$  выполнено в однородном квазистатически изменяющемся магнитном поле соленоида методом выносного индукционного датчика.

Для измерения возникающих при перемагничивании упругих колебаний образцы закреплялись в специальном держателе из дюралюминия (рис.1), позволяющем зажимать образцы с боковых поверхностей винтами с упором одной из торцевых поверхностей образца. Держатель образца помещался в соленоид с исключением механического контакта между держателем и стенками соленоида.



Рис. 1 – Держатель образца

Бесконтактное измерение магнитоэлектрического изменения размеров образцов производилось с помощью лазерного сканирующего виброметра Polytec PSV-500-NV. Измерение колебаний производили в режиме быстрого преобразования Фурье с регистрацией спектра колебаний в полосе частот от 4 до 10 Гц.

Измерения проводились в неоднородном поле. Переменное магнитное поле  $H_r$  соленоида изменялось по синусоидальному закону с частотой  $f_r = 4,5$  Гц.

Значения средней  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{avg}$  и максимальной  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{max}$  динамических магнитоэлектрических чувствительностей были рассчитаны с помощью программы “MgntstrSens” по полевым зависимостям магнитоэлектрики, измеренным с помощью лазерного сканирующего виброметра PSV-500-NV.

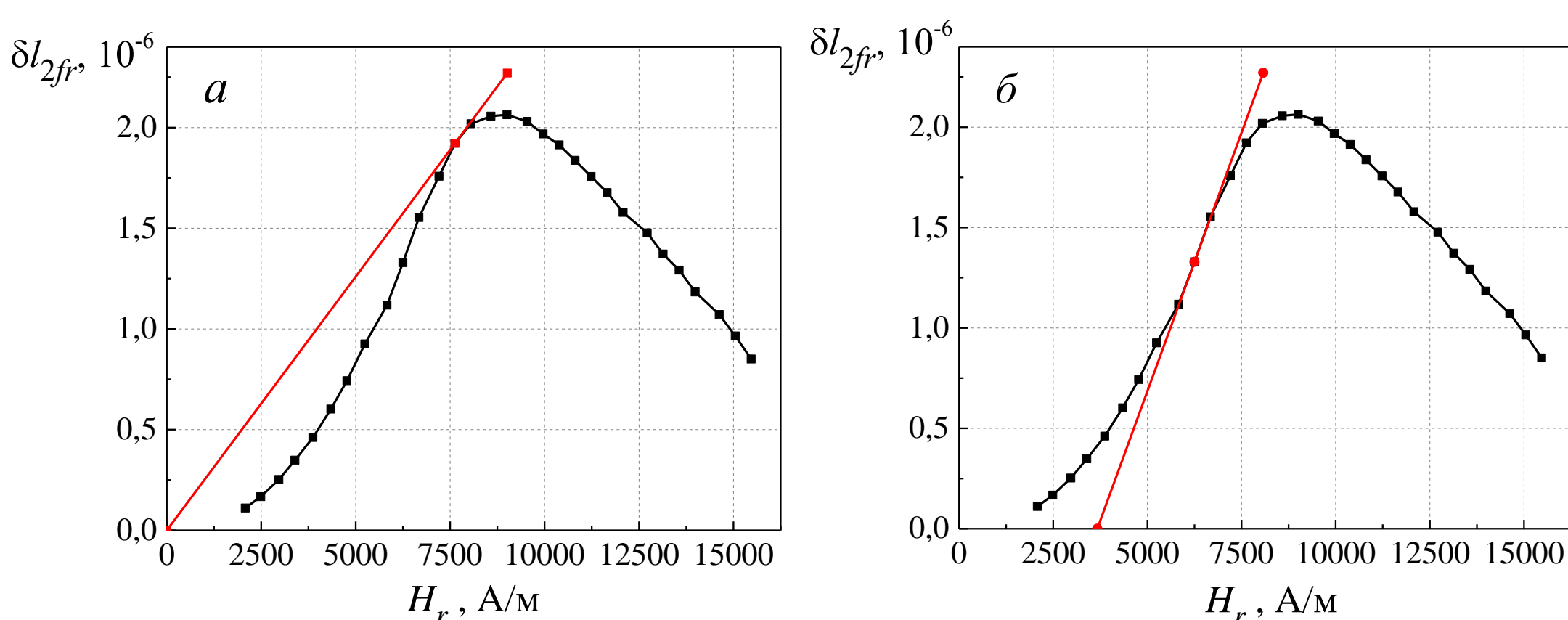


Рис. 2 – К определению средней (а) и максимальной (б) динамической магнитоэлектрической чувствительности

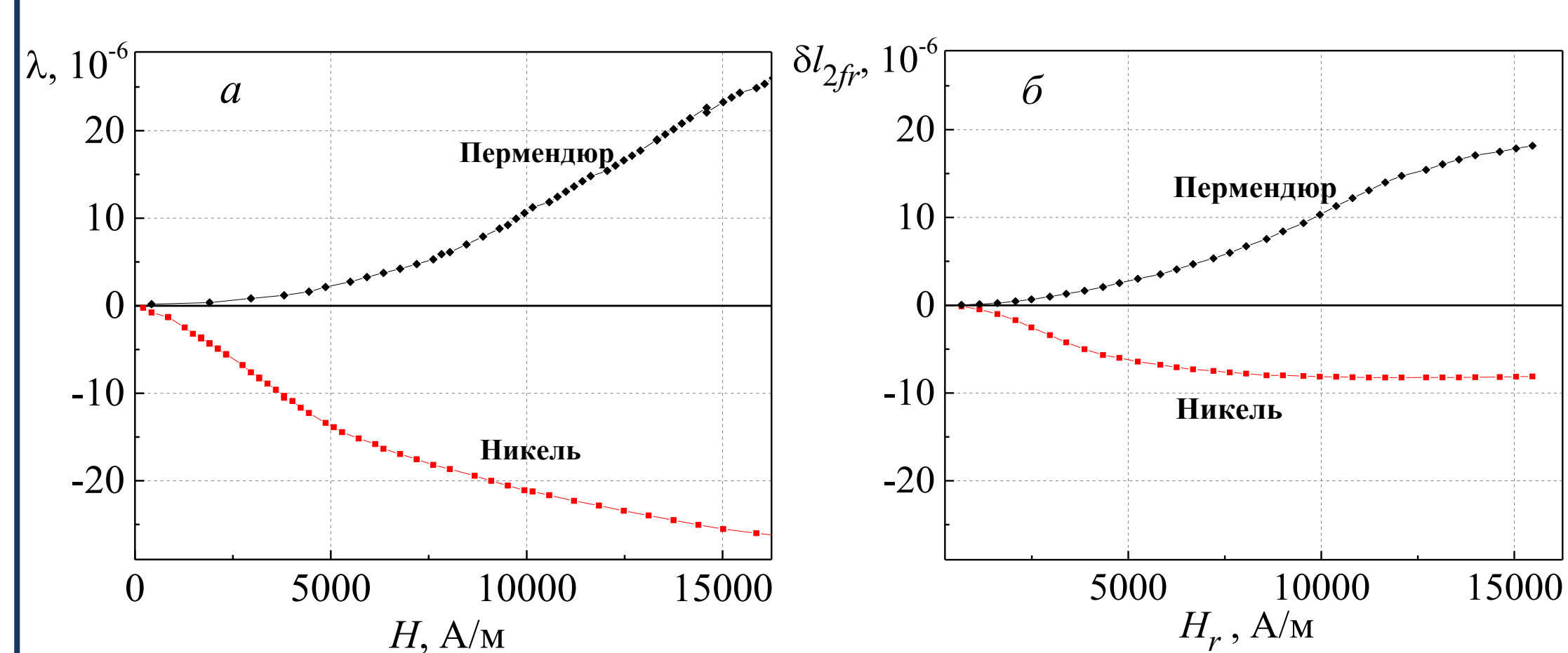
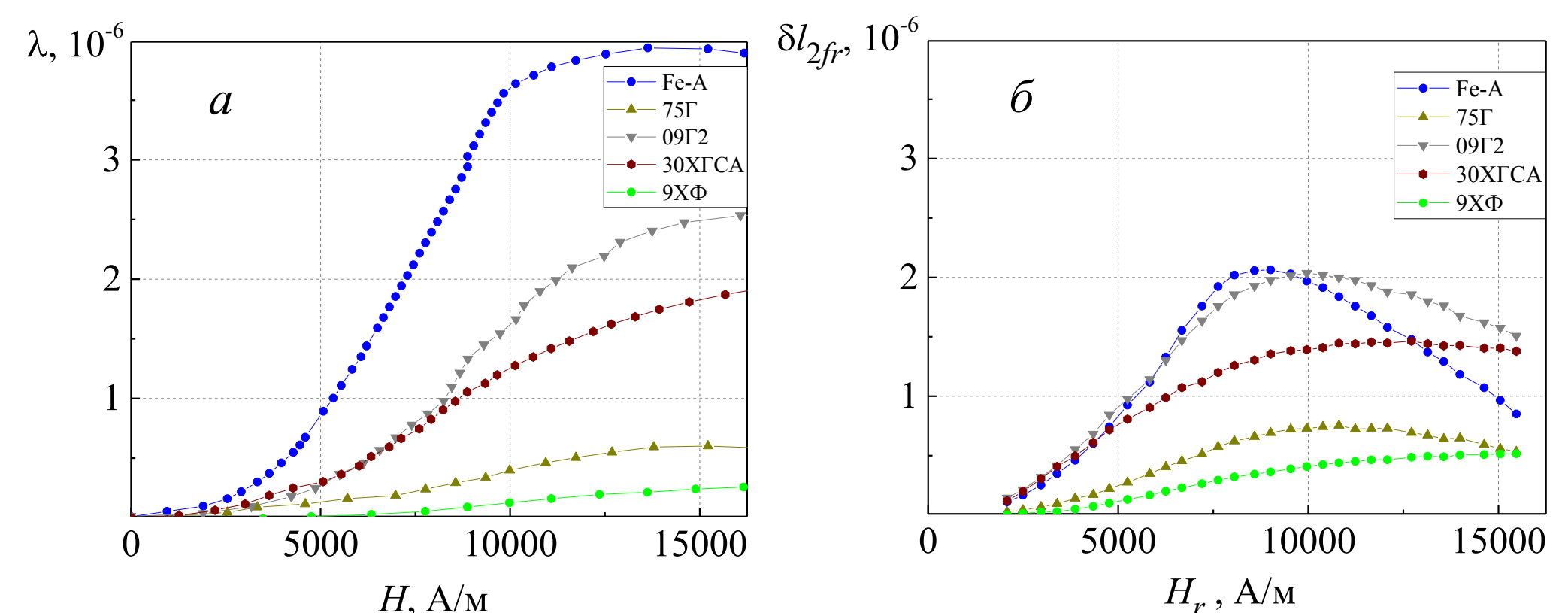
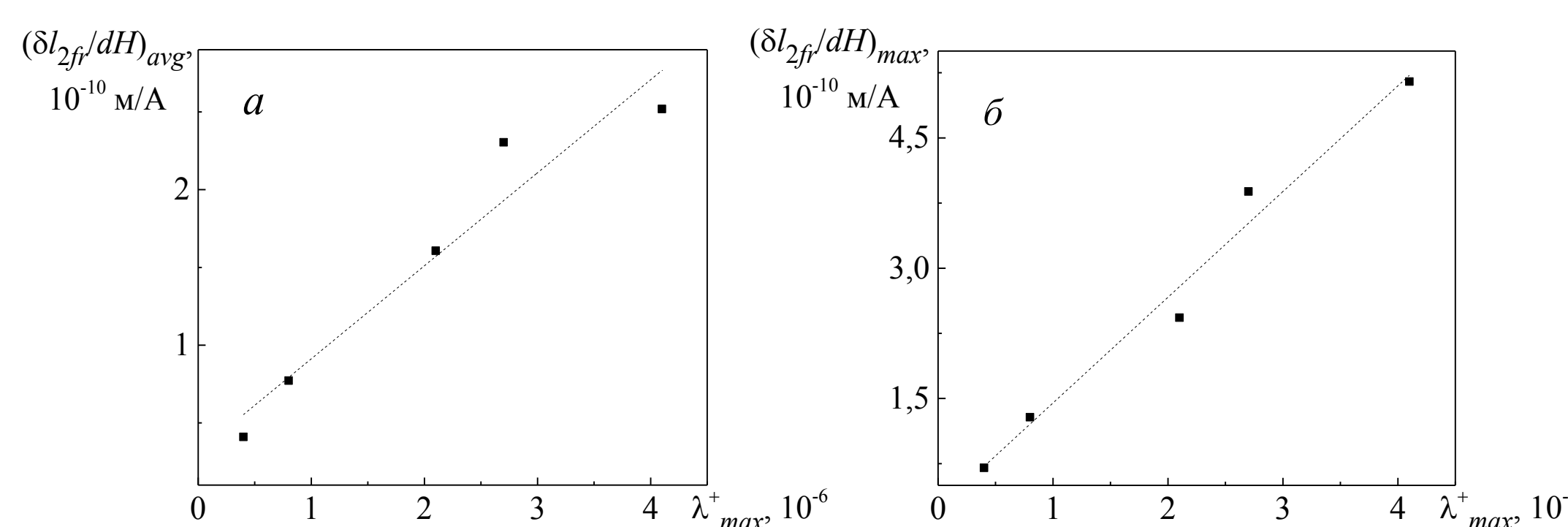
**Экспериментальные результаты**Рис. 3 – Полевые зависимости статической магнитоэлектрики  $\lambda$  пермендюра и никеля, измеренные методом выносного индукционного датчика (а), и полевые зависимости амплитуды изменения размеров образцов  $\delta l_{2fr}$ , измеренные с помощью лазерного виброметра (б)Рис. 4 – Полевые зависимости статической магнитоэлектрики  $\lambda$  сталей различного химического состава, измеренные методом выносного индукционного датчика (а), и полевые зависимости амплитуды изменения размеров образцов  $\delta l_{2fr}$ , измеренные с помощью лазерного виброметра (б)

Рис. 5 – Зависимости средней (а) и максимальной (б) динамической магнитоэлектрической чувствительности сталей от величины их положительного максимума магнитоэлектрики

Квадрат коэффициента линейной корреляции величин  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{avg}$  и  $\lambda^+_{max}$  равен  $R^2 = 0,91$ , а для величин  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{max}$  и  $\lambda^+_{max}$  следует  $R^2 = 0,97$ . Таким образом, среднее и максимальное значения динамической магнитоэлектрической чувствительности сталей хорошо коррелируют с величиной максимального удлинения исследованных сталей.

Как видно из рис. 4 и 5, выход на насыщение и уменьшение динамической магнитоэлектрической чувствительности  $\delta l_{2fr}/dH_r$  происходит при меньших значениях перемагничивающего поля  $H_r$ , чем для статической магнитоэлектрики  $\lambda$ . В наибольшей степени это характерно для материалов с высокой магнитной восприимчивостью (пермендюр, никель, Армко-железо). Поэтому логично связать такое поведение величины  $\delta l_{2fr}/dH_r$  со скин-эффектом, когда промагничивается не все сечение образца. Второй возможной причиной может быть использование неоднородного переменного поля, когда поле на концах образца существенно меньше, чем поле в центре, и это различие должно увеличиваться по мере роста намагниченности.

**Заключение.** Показана возможность бесконтактного измерения низкочастотных упругих колебаний, возникающих при перемагничивании ферромагнетиков с помощью лазерной интерферометрии. Установлено, что определяемые по амплитуде второй гармоники упругих колебаний образца среднее и максимальное значения динамической магнитоэлектрической чувствительности сталей коррелируют с величиной максимального магнитоэлектрического удлинения исследованных сталей и могут быть характеристиками динамической магнитоэлектрики материалов.