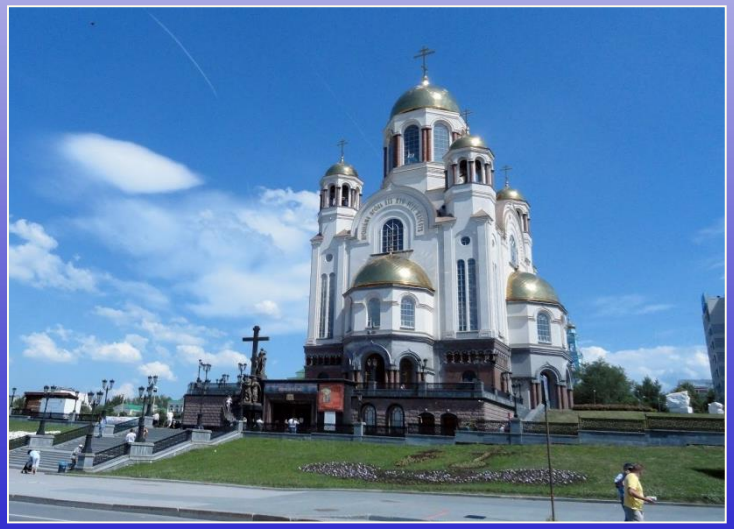


Екатеринбург



Созопол





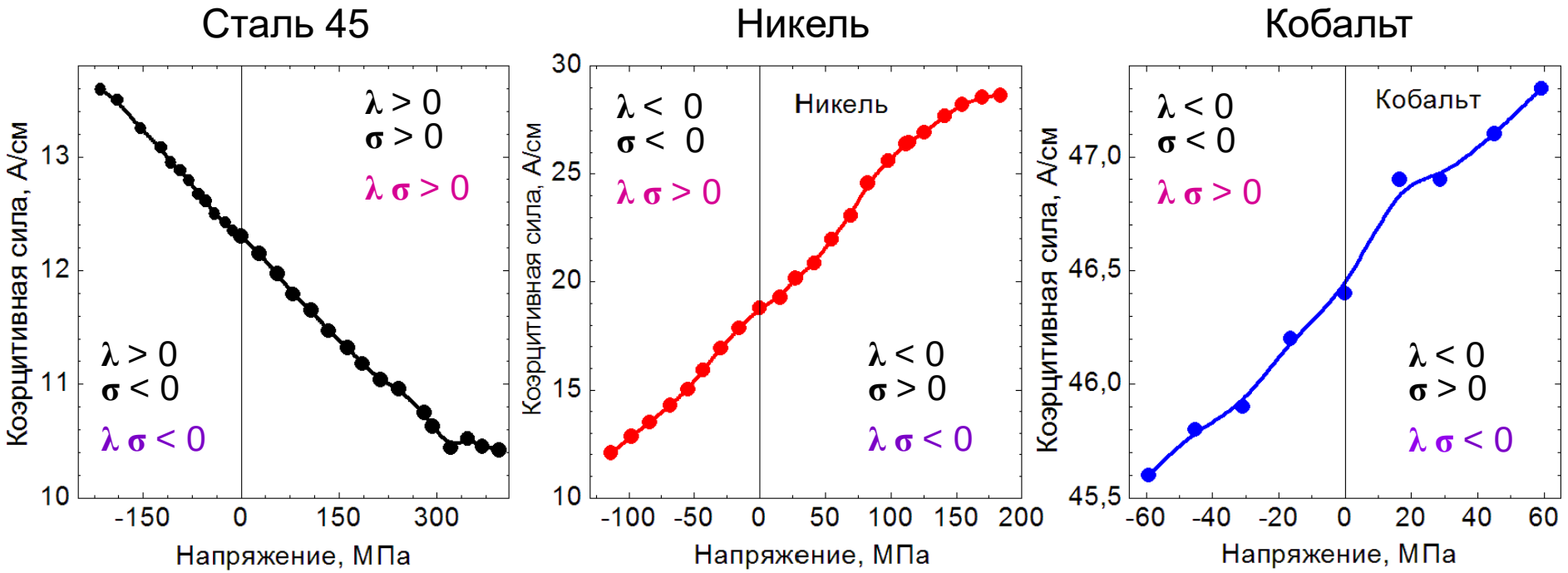
ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЙ МАГНИТНЫМИ И АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Горкунов Э.С.

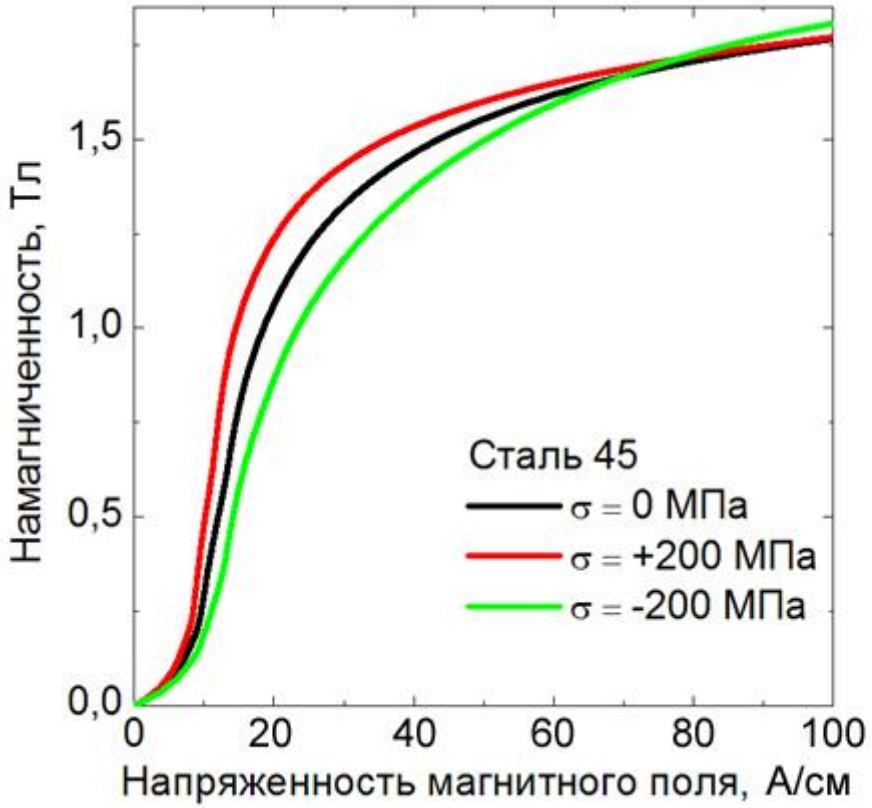
Россия, Екатеринбург

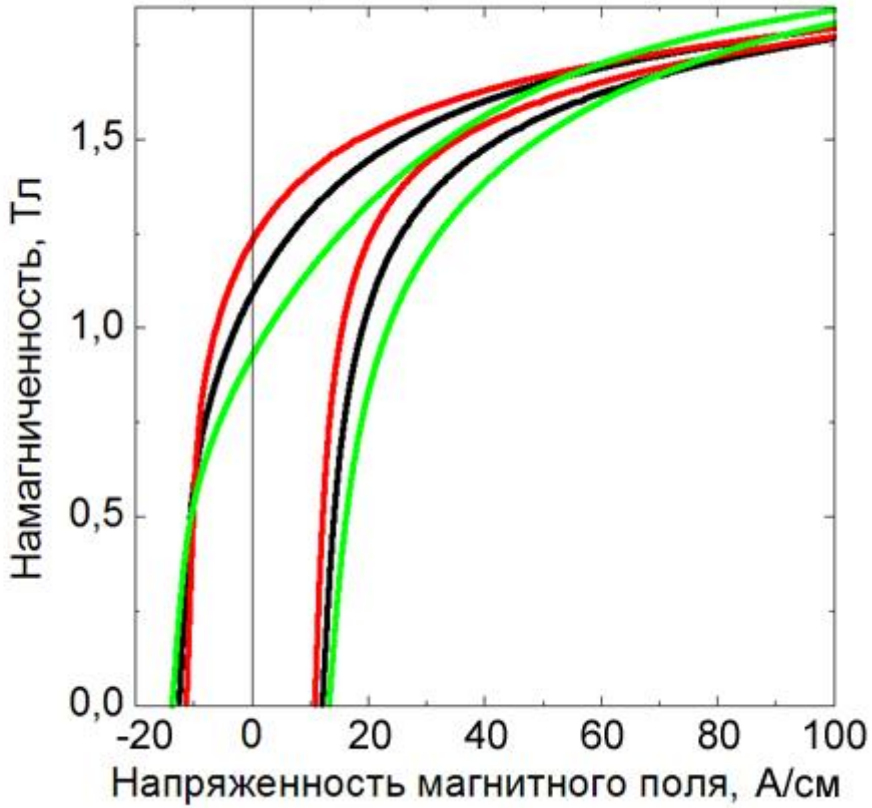
Созополь, июнь 2018

Влияние напряжений растяжения и сжатия (σ) на коэрцитивную силу ферромагнетиков с различной магнитострикцией (λ)

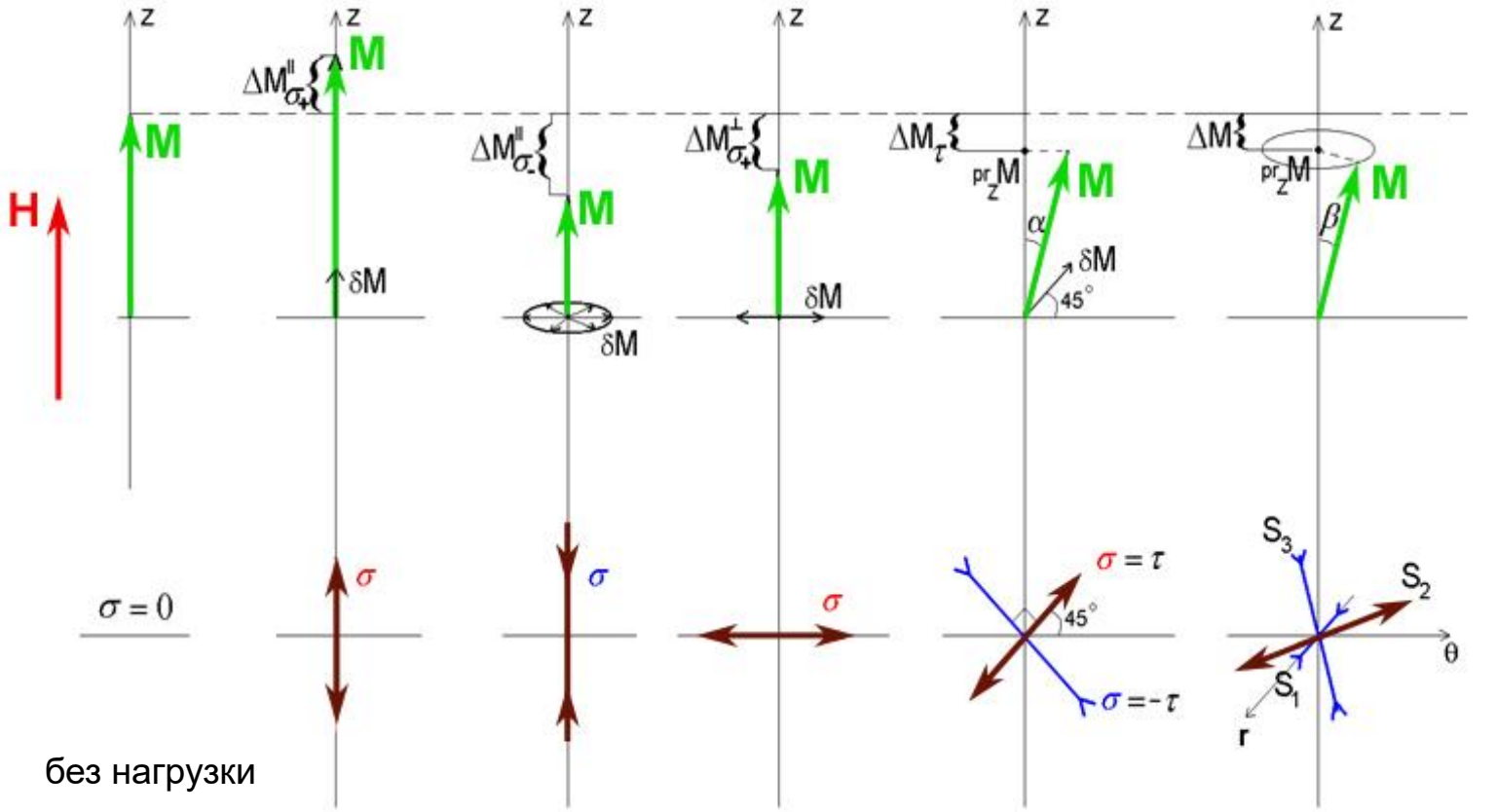


Кривые намагничивания и петли гистерезиса для стали 45





Влияние приложенных упругих напряжений на намагниченность ферромагнетика с положительной магнитострикцией



без нагрузки

одноосное *растяжение*

одноосное *сжатие*

растяжение перпендикулярно направлению поля

кручение соосно полю

комбинированный случай

Полевые зависимости продольной магнитострикции при различных значениях приложенных напряжений растяжения и сжатия

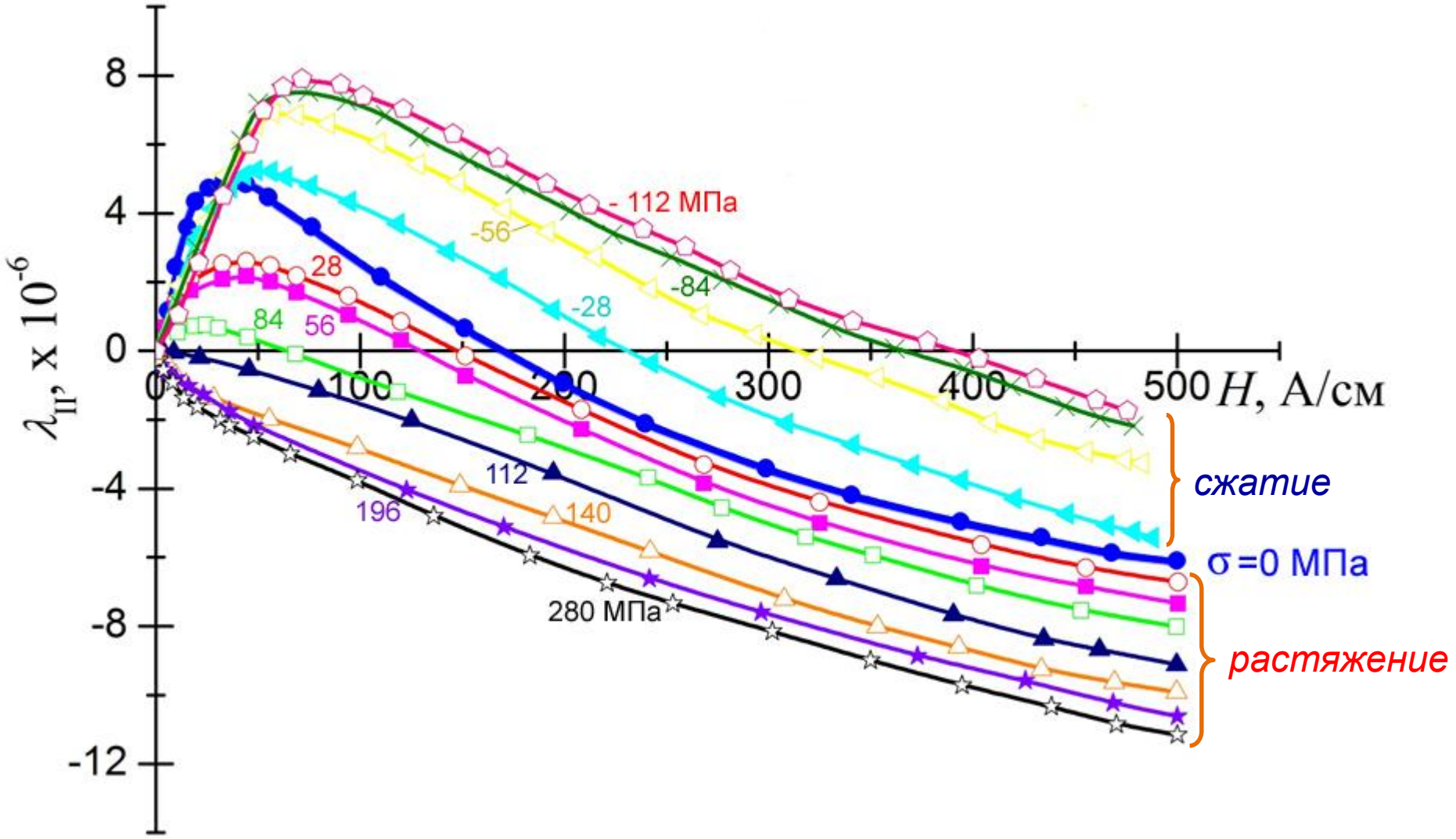
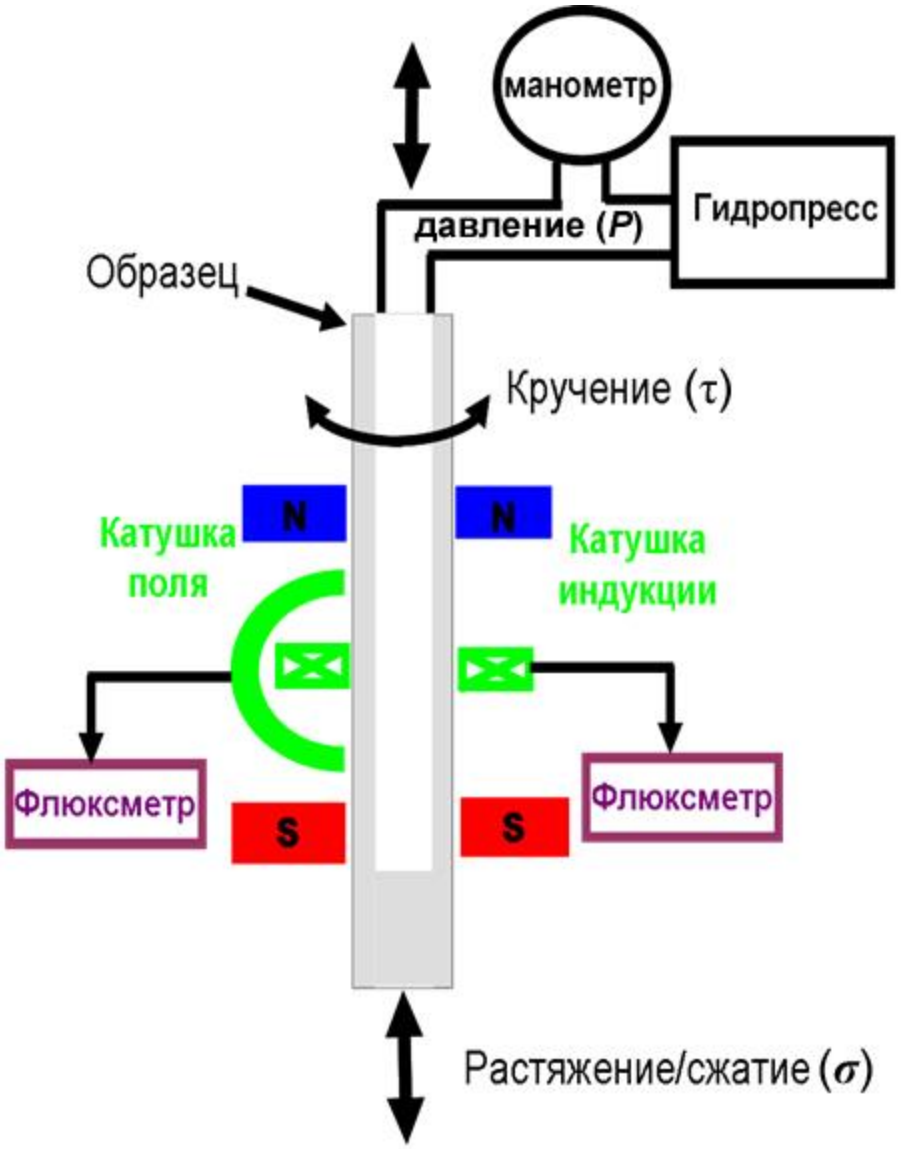
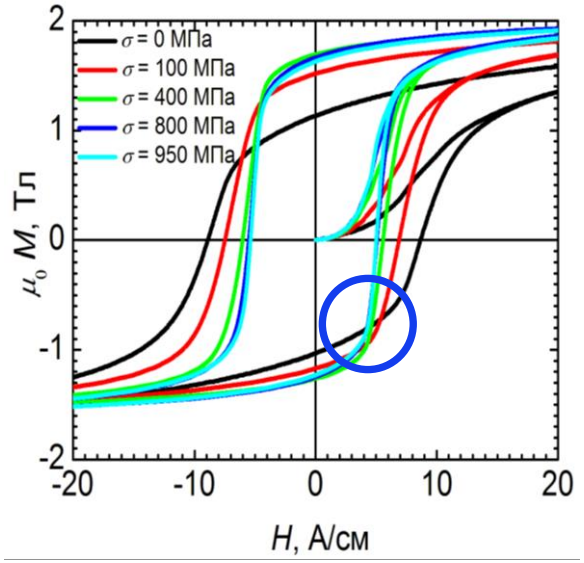


Схема испытательного стенда для определения магнитных характеристик материалов при упругопластическом деформировании

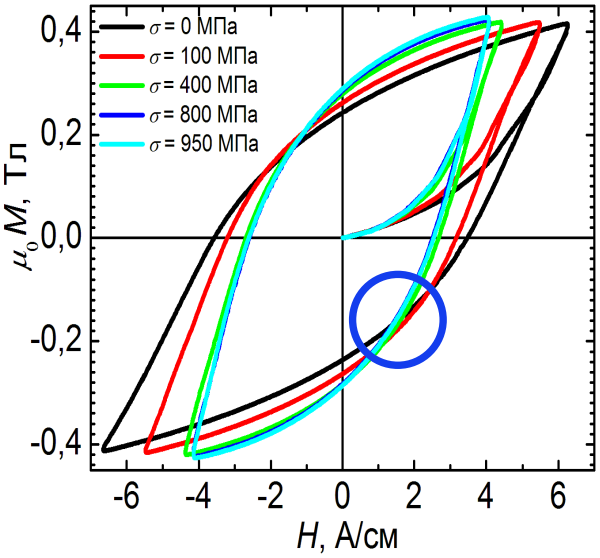


Испытательный стенд позволяет проводить измерения магнитных параметров материалов в условиях действия нормальных (σ) и касательных (τ) напряжений, внутреннего давления (P), а также их комбинации.

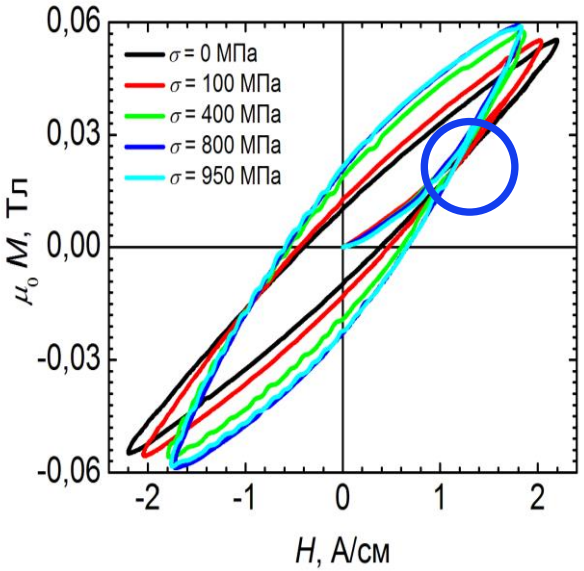
Эволюция петель магнитного гистерезиса при одноосном растяжении



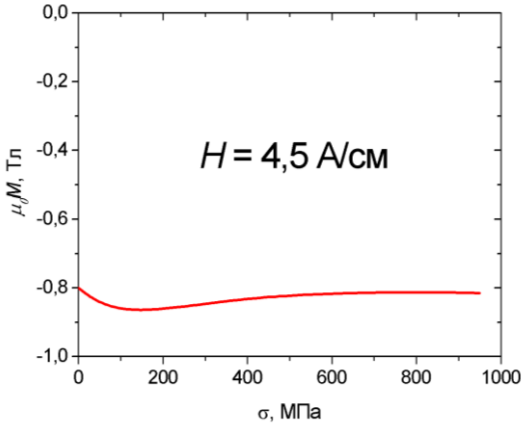
Предельные петли

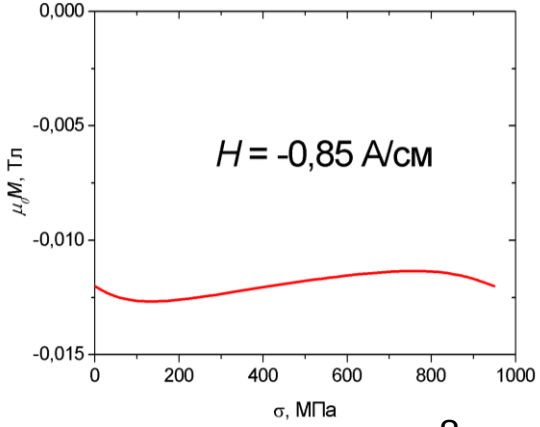


B_{max} = 0.4 Тл

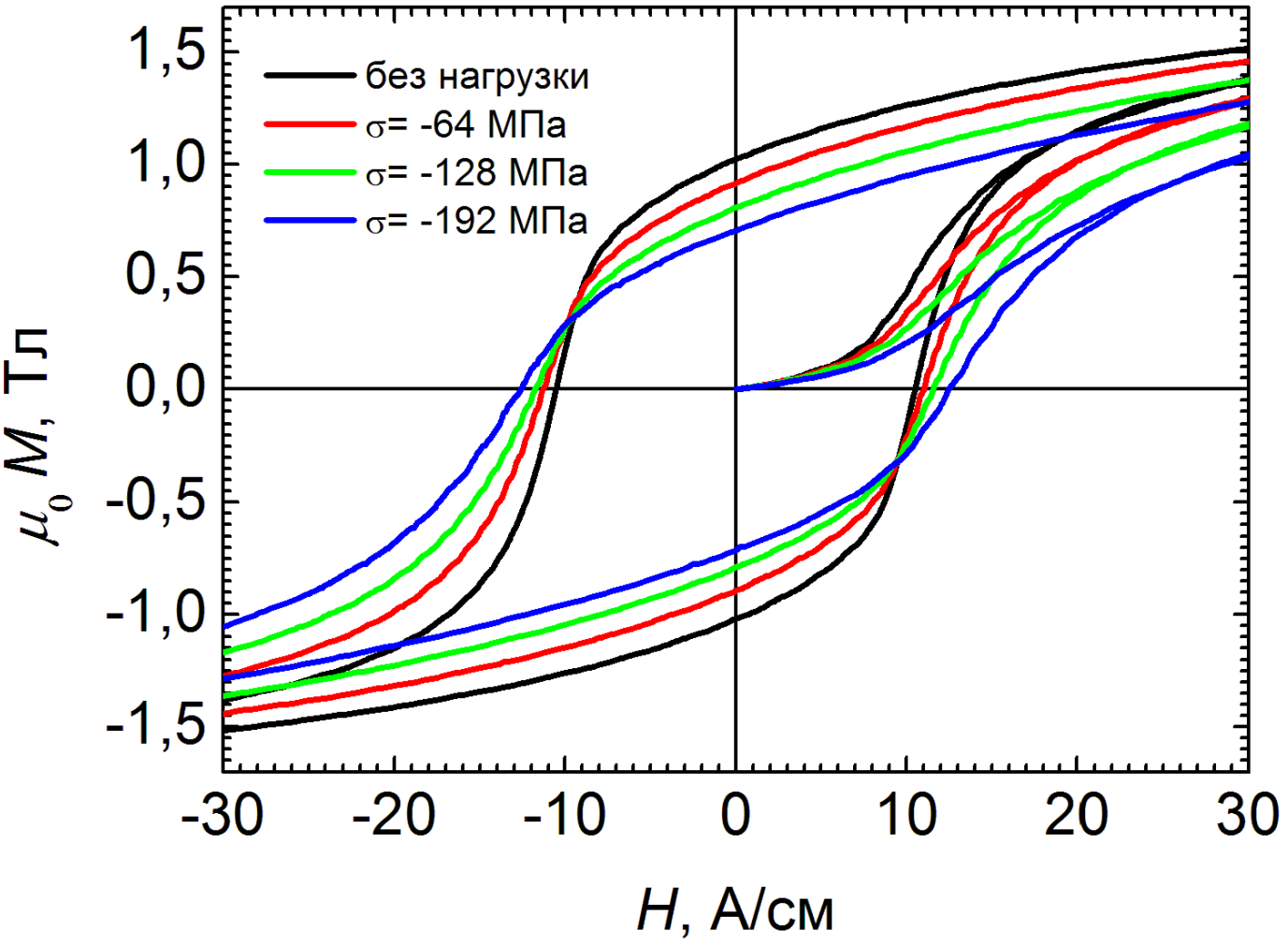


B_{max} = 0.05 Тл



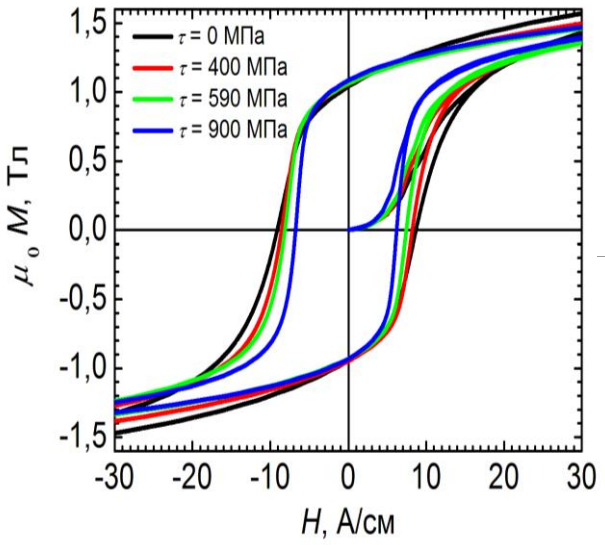


Эволюция петель магнитного гистерезиса при сжатии

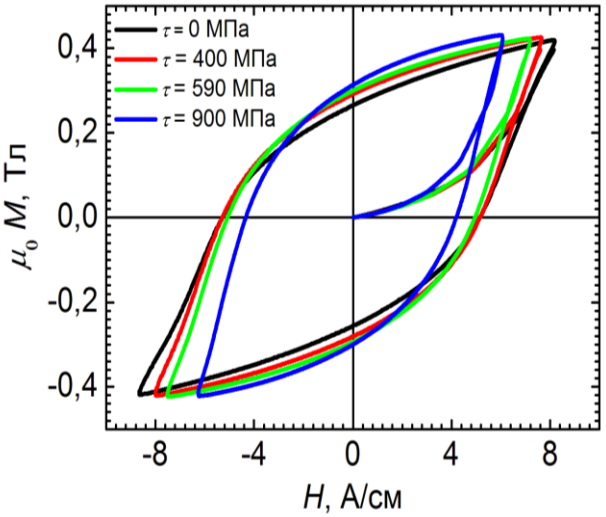


Предельные петли

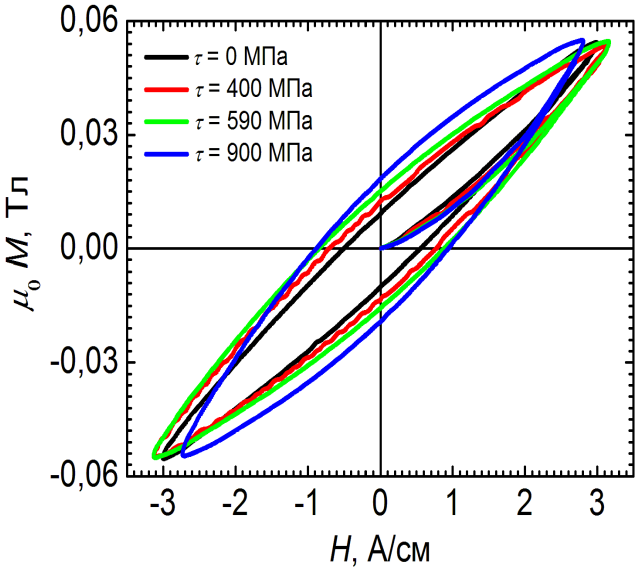
Эволюция петель магнитного гистерезиса при кручении



Предельные петли



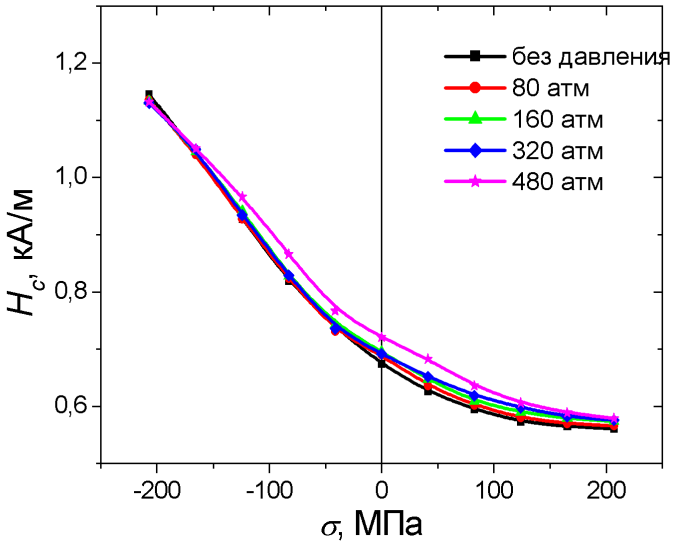
B_{max} = 0.4 Тл



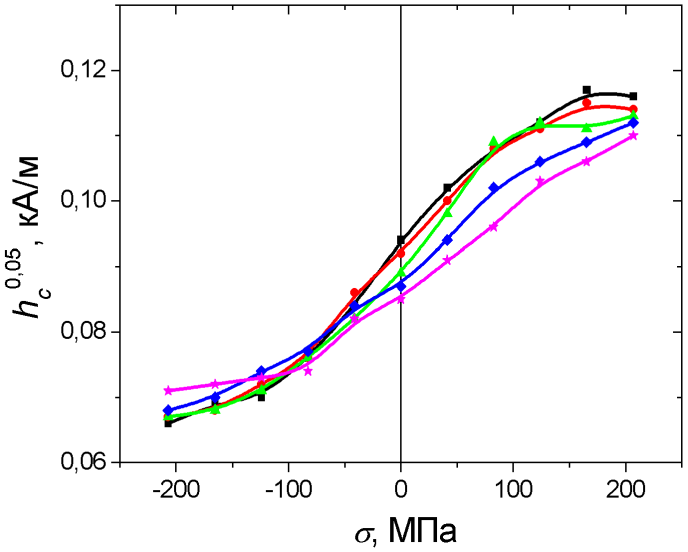
B_{max} = 0.05 Тл

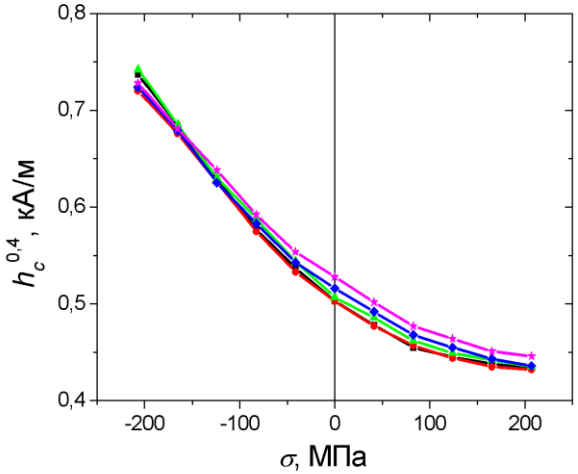
Зависимости магнитных характеристик стали 11ХН3Д от нормальных напряжений

Сильные поля

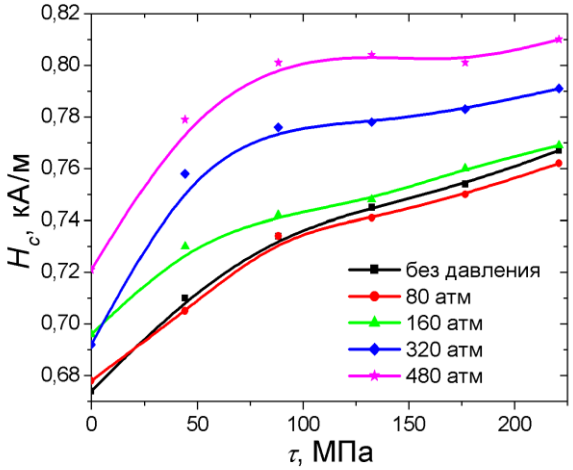


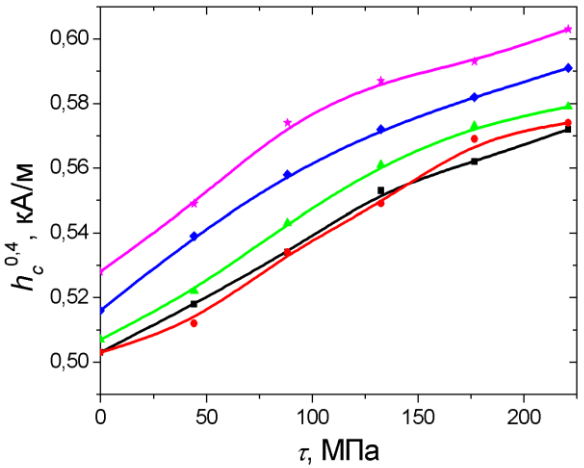
Слабые поля

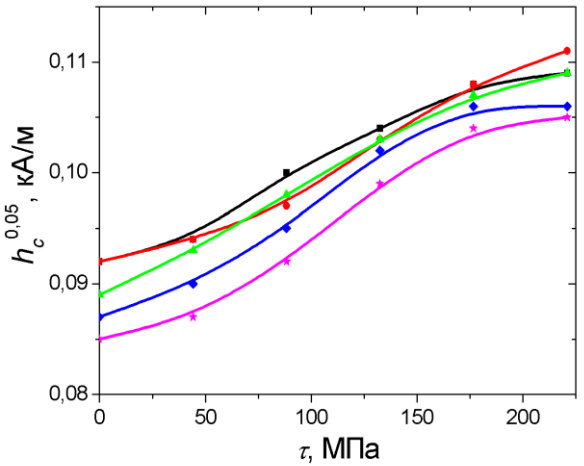


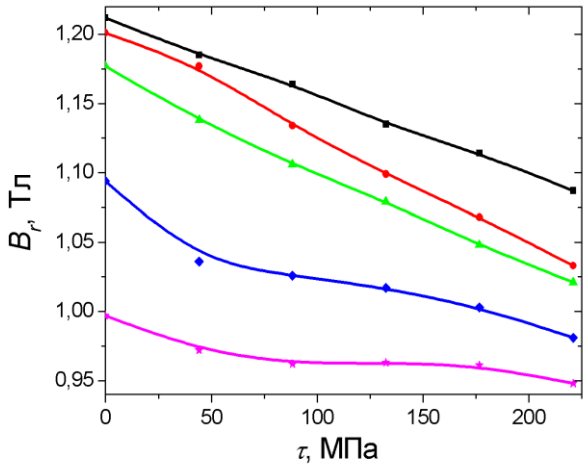


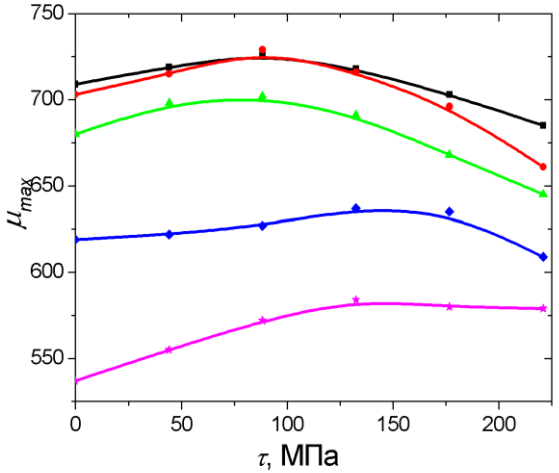
Зависимости магнитных характеристик стали 11ХН3Д от касательных напряжений



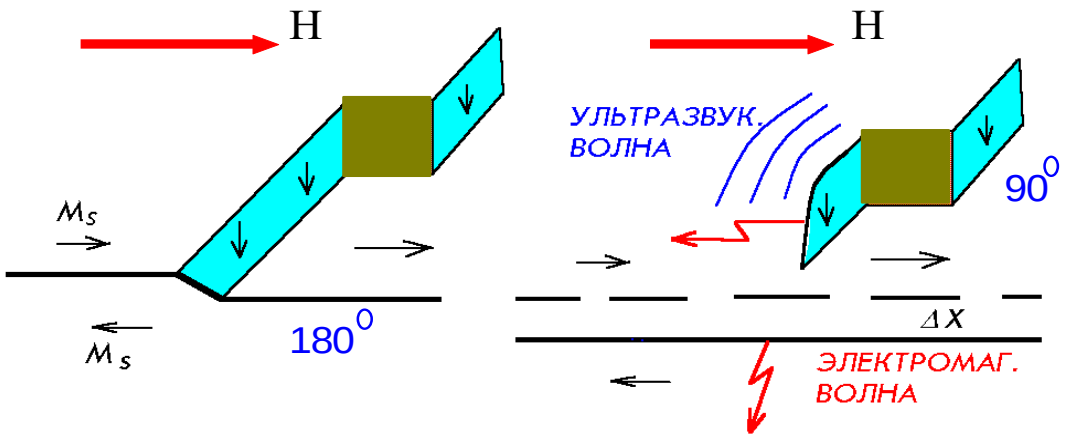


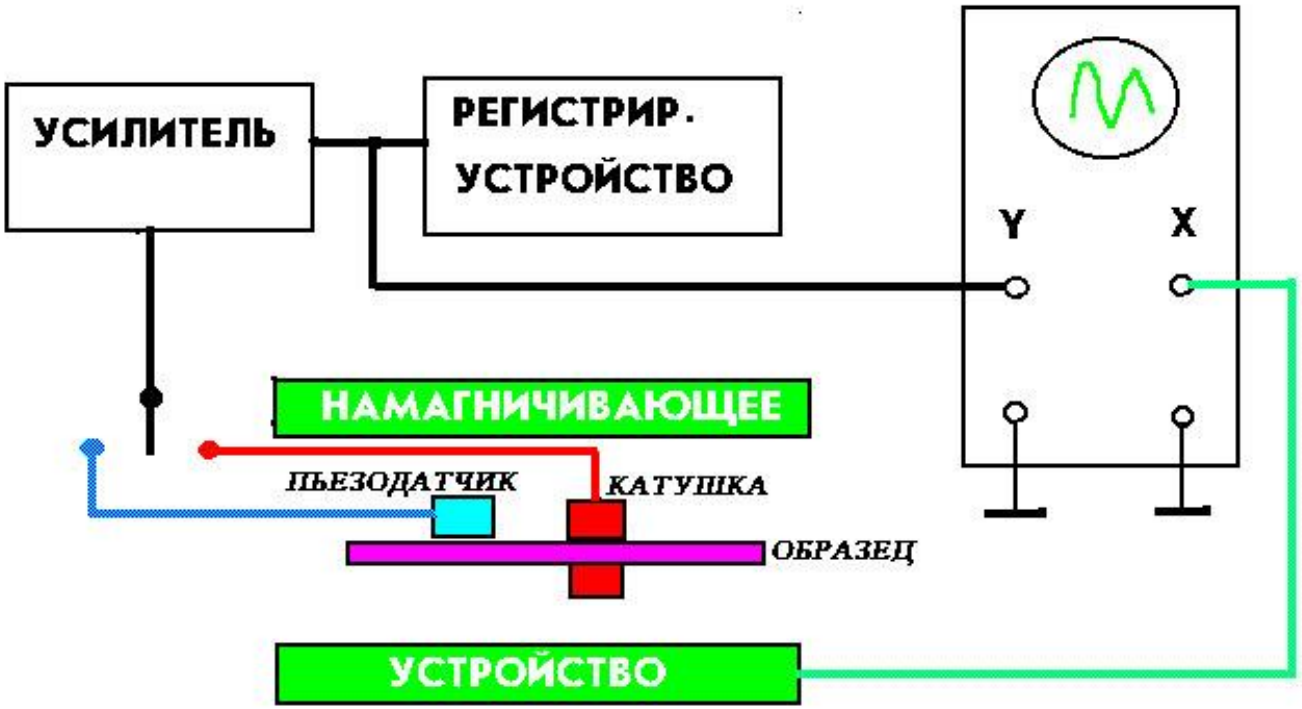




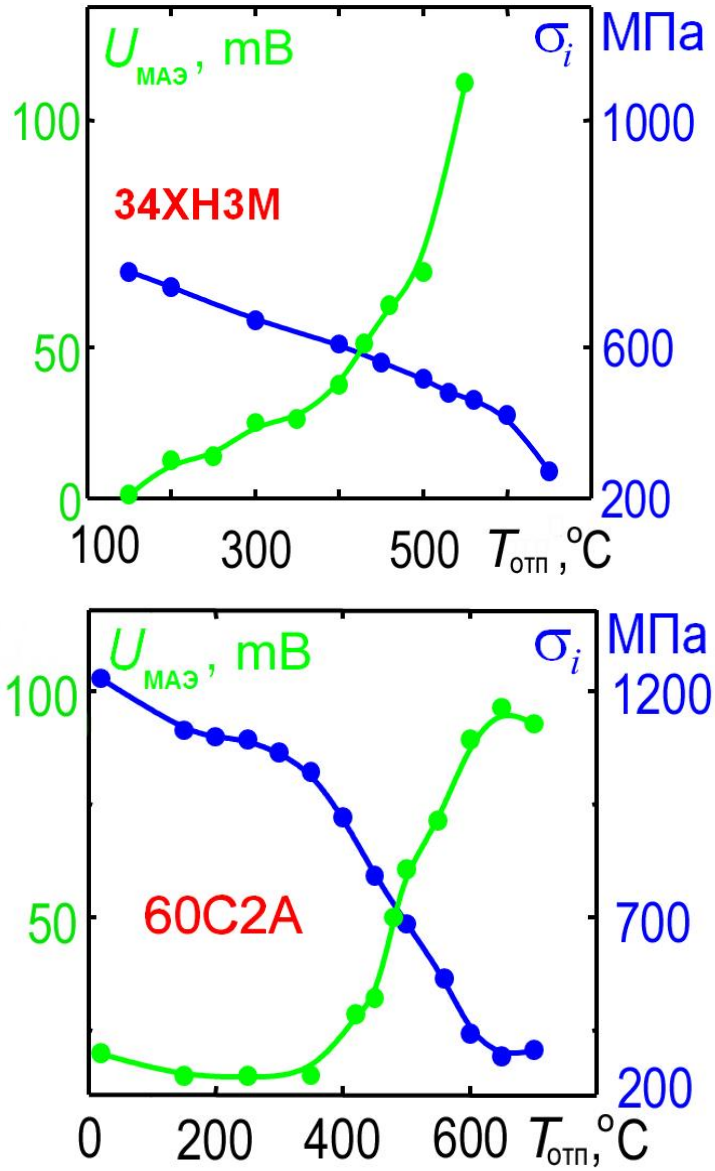


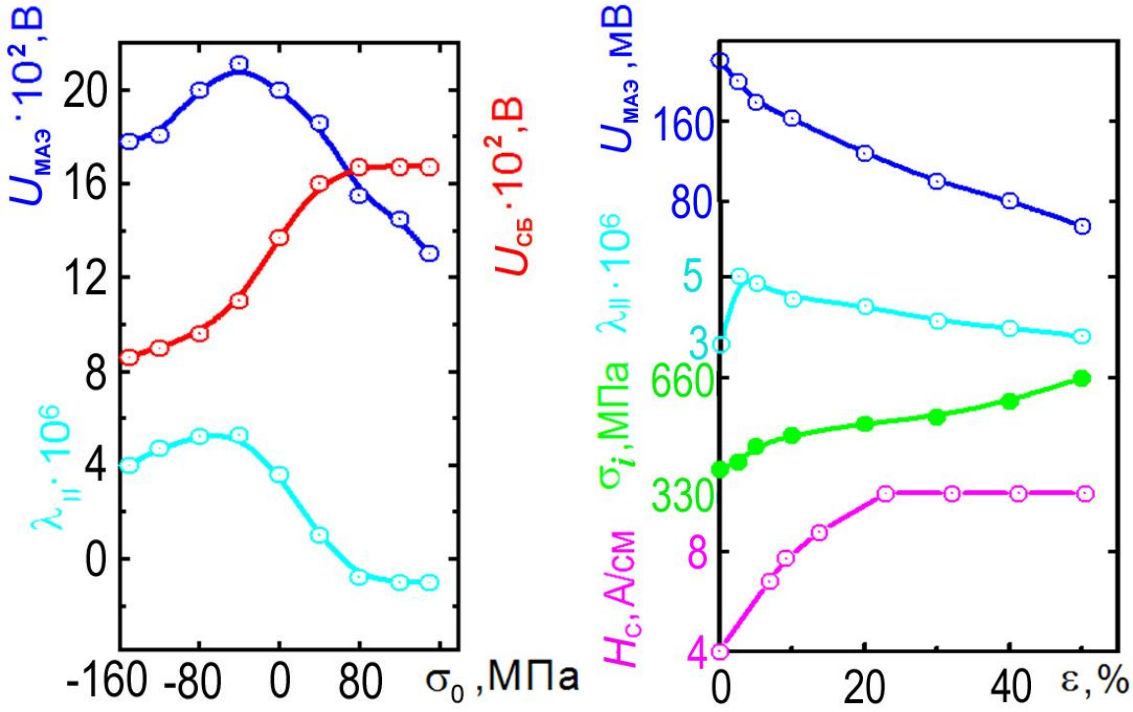
Магнитоупругая акустическая эмиссия





Оценка макро- и микронапряжений по параметрам магнитоупругой акустической эмиссии (МАЭ) и скачков Баркхаузена (СБ)

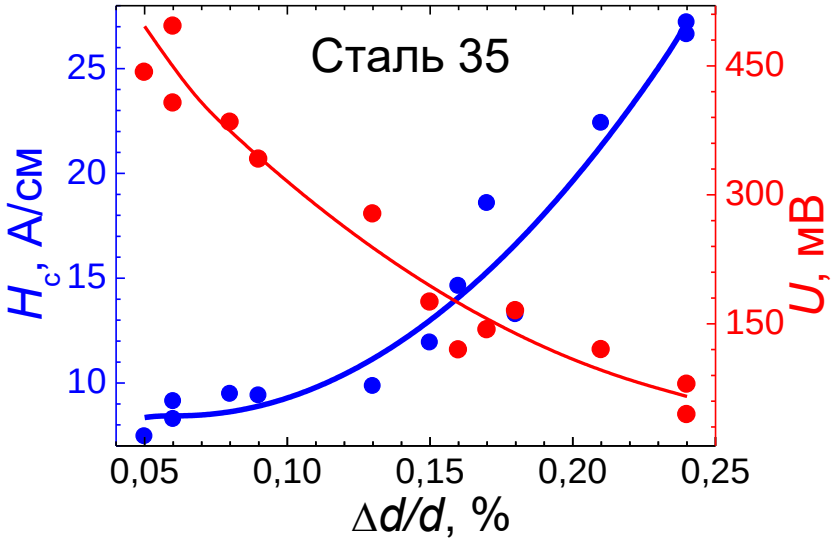


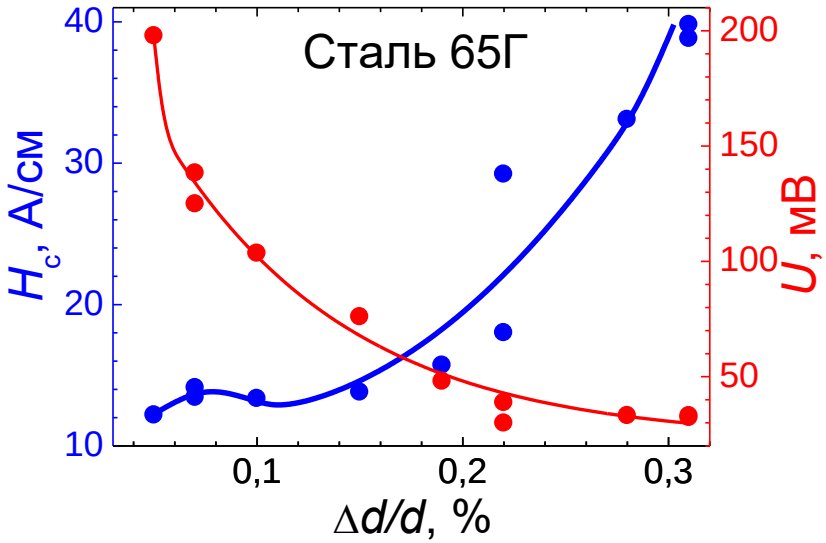


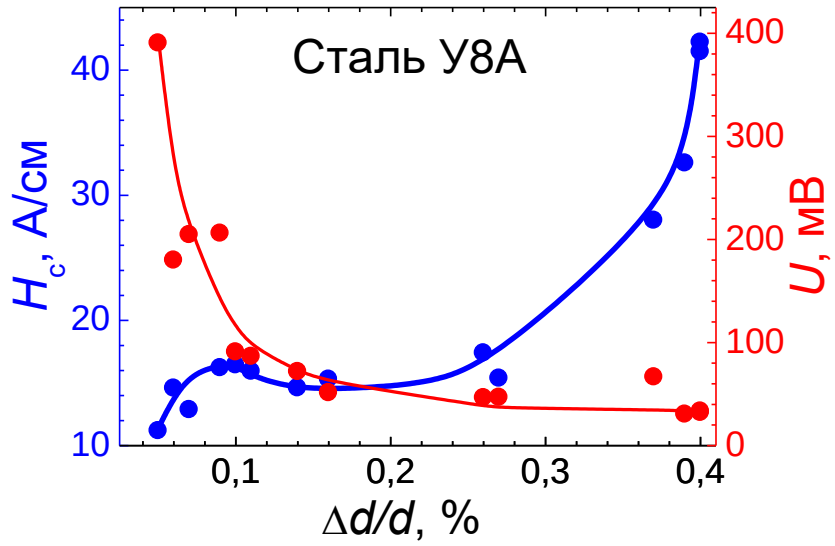
Влияние упругой и пластической деформации

Зависимость параметров магнитоупругой акустической эмиссии от температуры отпуска

Зависимости коэрцитивной силы H_c (●) и среднеквадратичного значения напряжения магнитных шумов баркгаузена U (●) от микроискажений кристаллической решетки термически обработанных сталей 35, 65Г и У8А

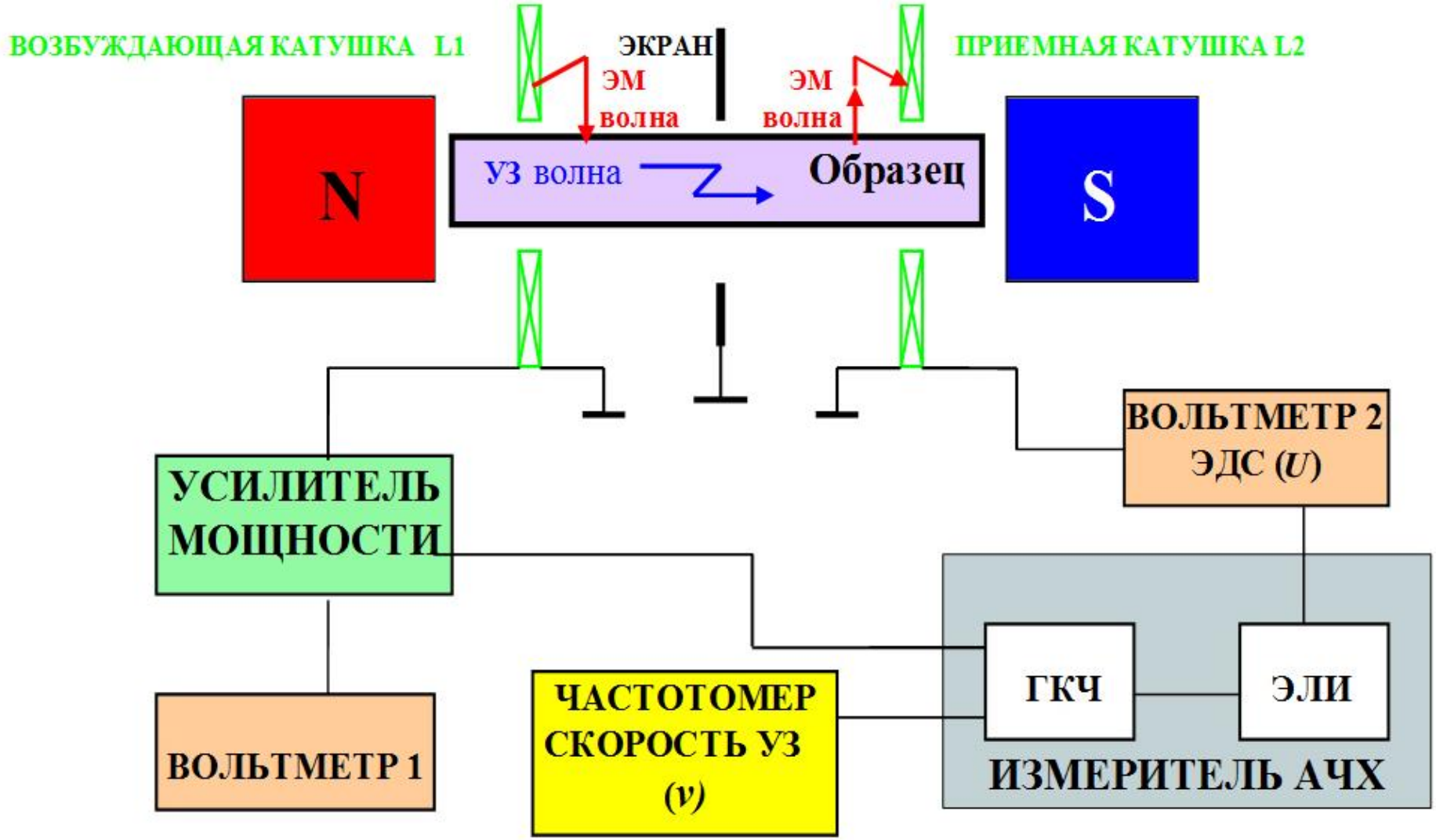




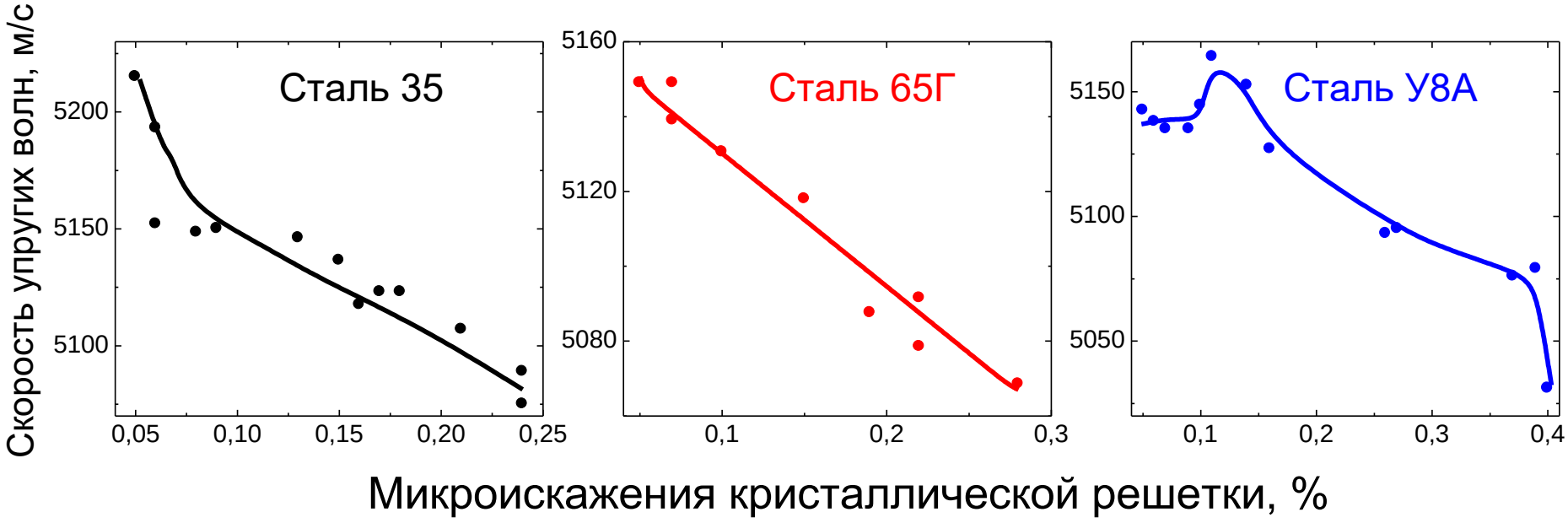


Параметры магнитных шумов Баркгаузена определяли с помощью цифрового анализатора шумов Баркгаузена MicroScan 600 производства Stresstech group GmbH (Германия)

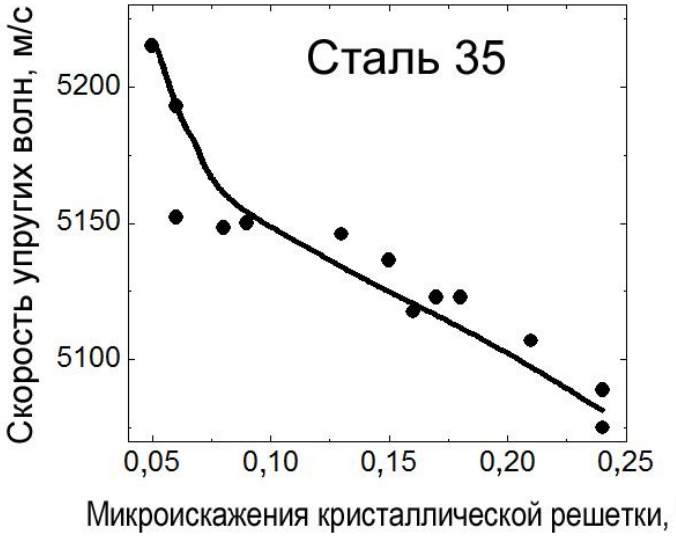
Блок схема установки для исследования двойного электромагнитно - акустического преобразования (ЭМАП)

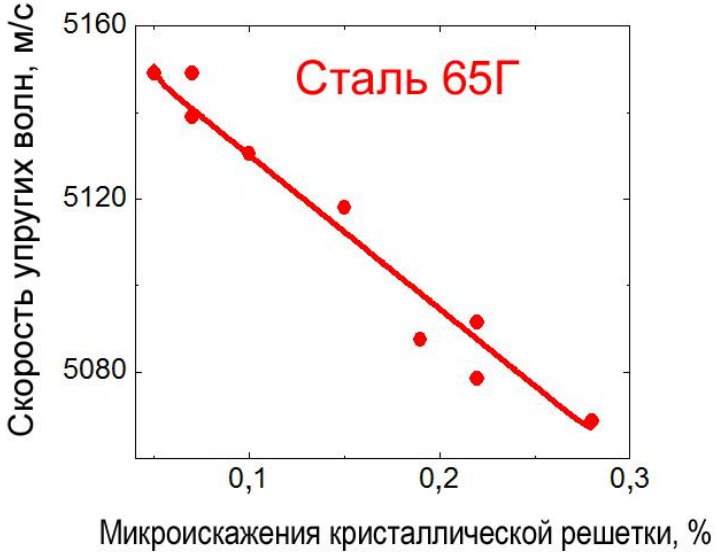


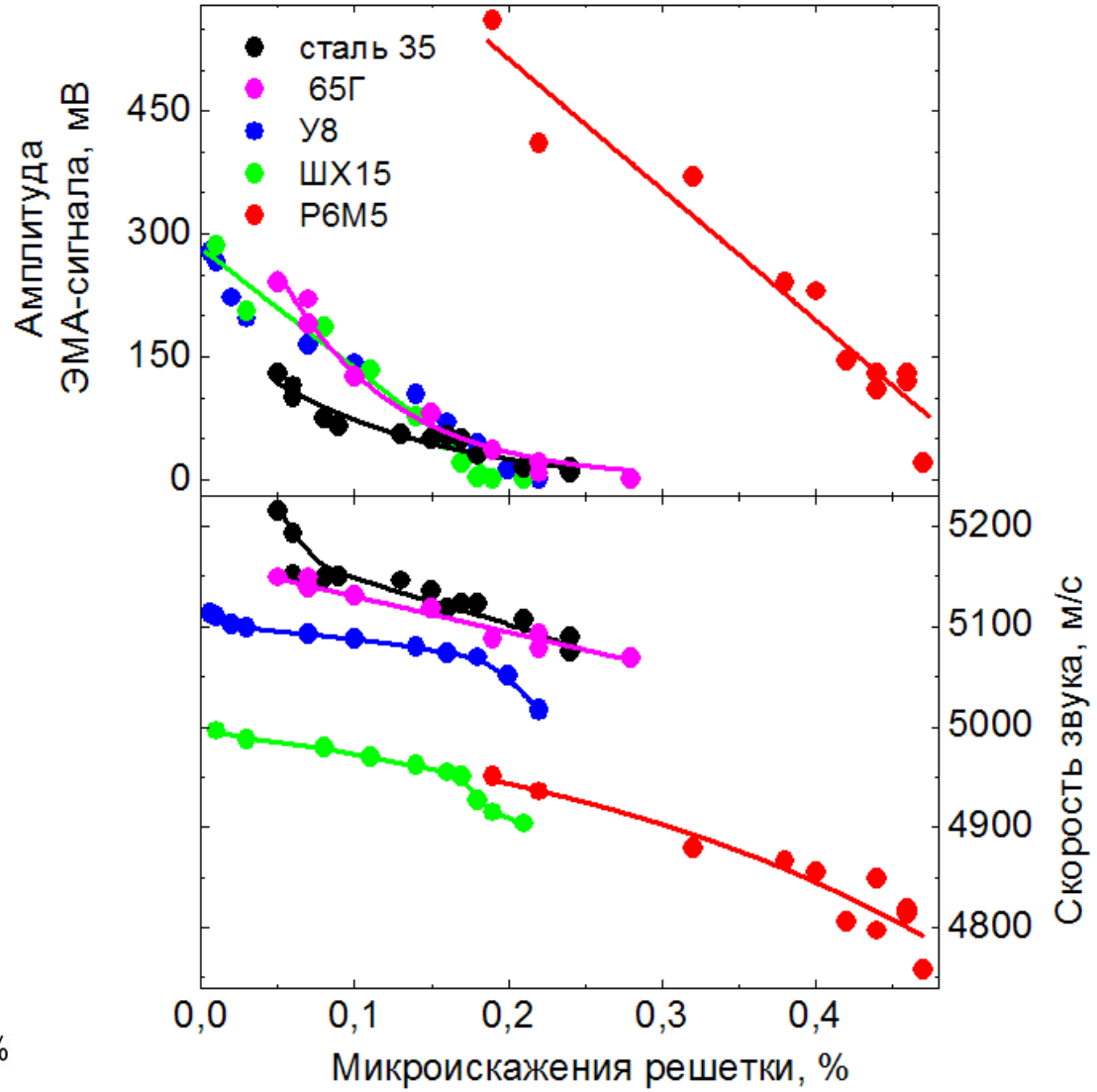
Оценка внутренних напряжений в термически обработанных сталях с помощью электромагнитно-акустического преобразования



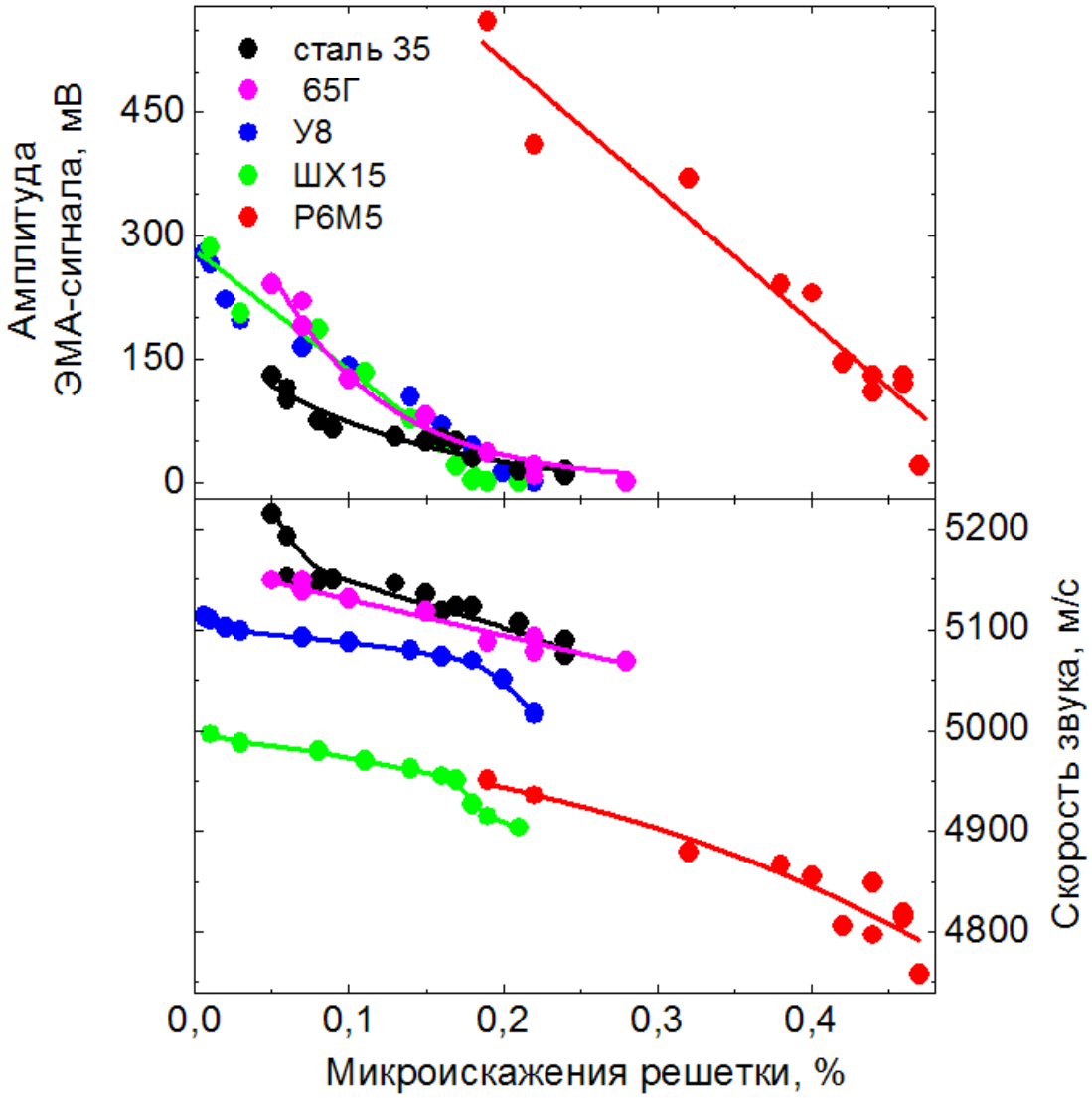
Оценка внутренних напряжений в термически обработанных сталях с помощью электромагнитно-акустического преобразования







Взаимосвязь параметров сигнала ЭМАП с микроискажениями кристаллической решетки термически обработанных сталей



Взаимосвязь параметров сигнала ЭМАП с микроискажениями кристаллической решетки холоднодеформированных углеродистых сталей

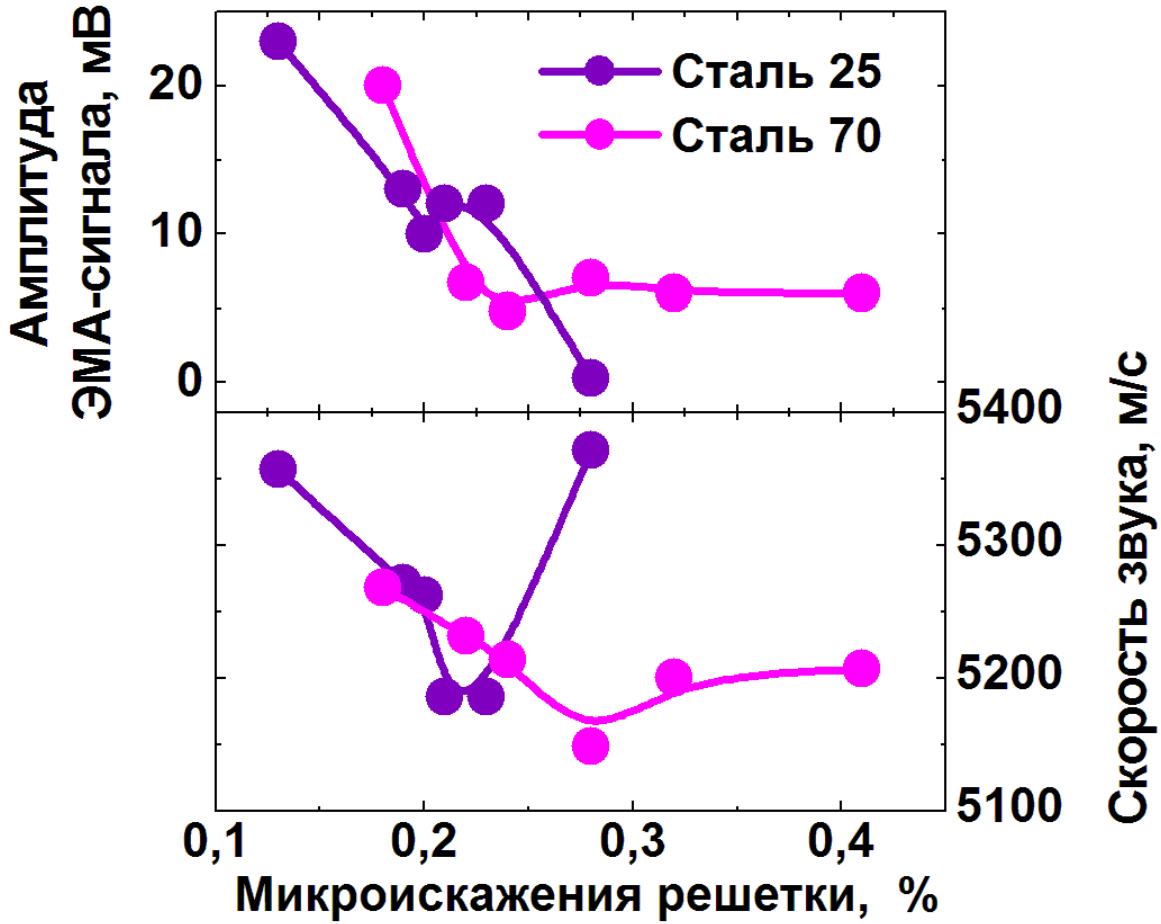
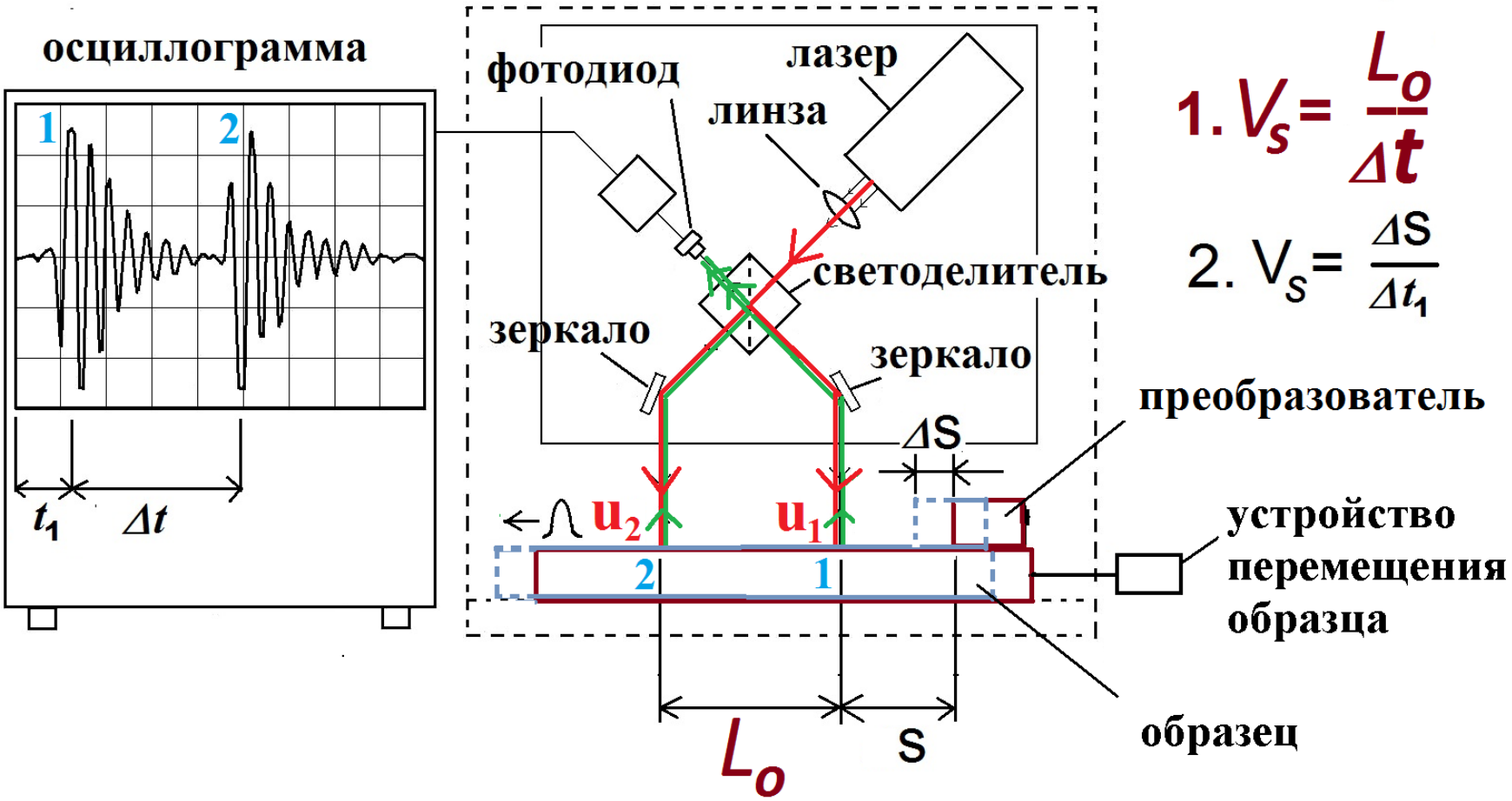


Схема спекл-интерферометрической установки для определения скорости ультразвуковой волны Рэлея

$$I \sim (2\pi/\lambda)(u_1 - u_2)$$

I – интенсивность излучения в области перекрытия двух спеклов

u_1, u_2 – смещения участков 1 и 2 по нормали



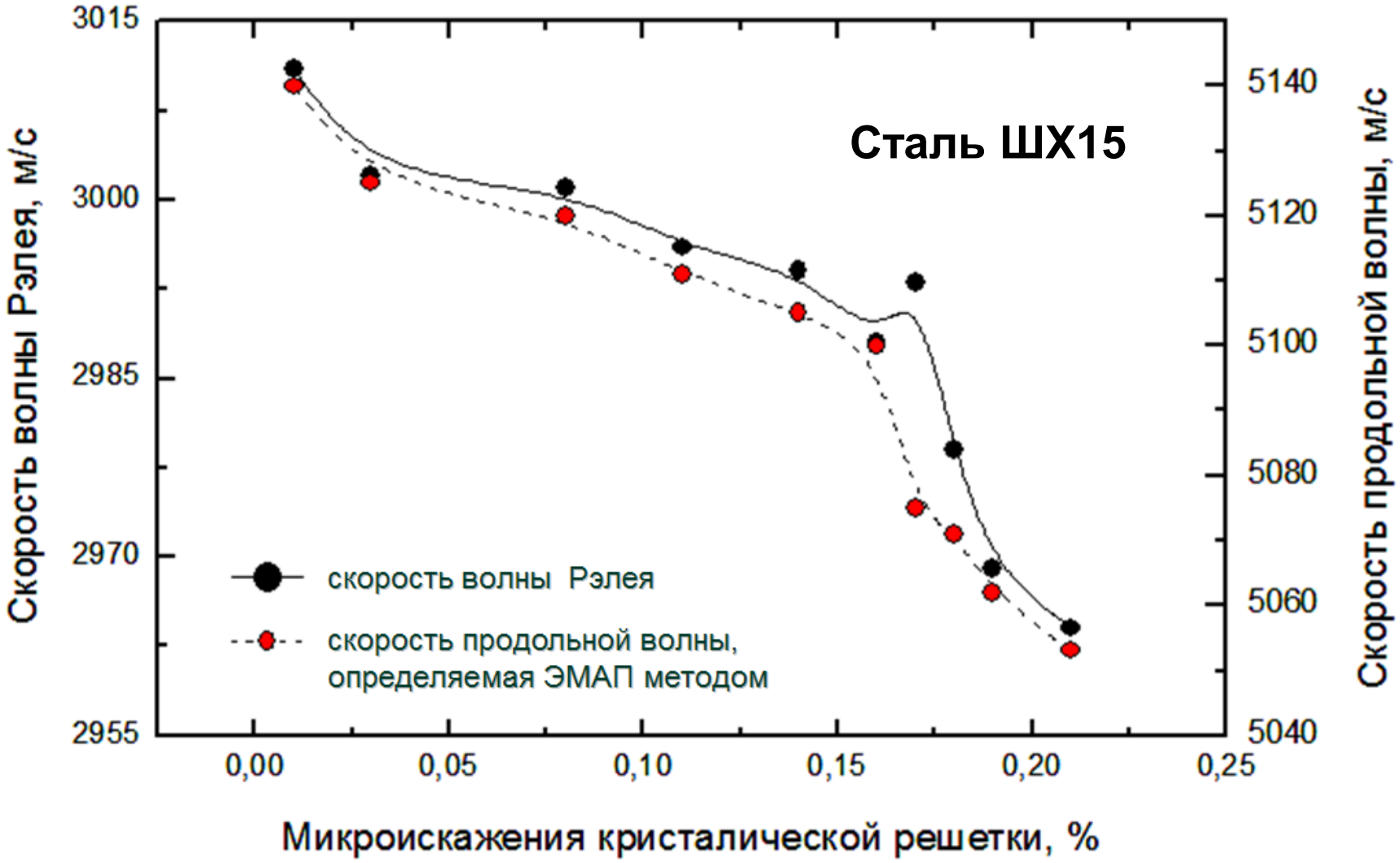
$$1.\ V_s = \frac{L_o}{\Delta t}$$

$$2.\ V_s = \frac{\Delta S}{\Delta t_1}$$

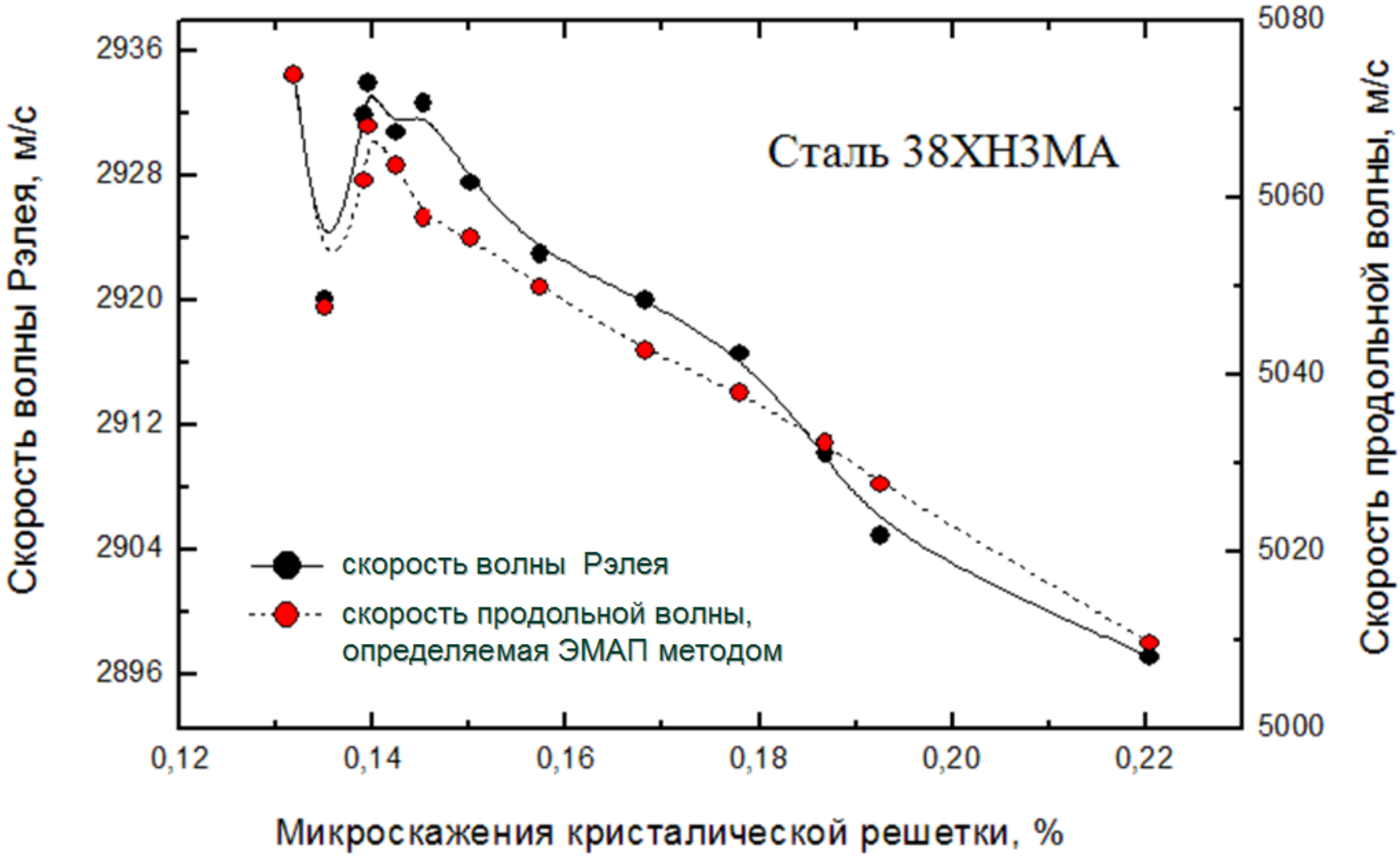
Общий вид установки



Зависимости скоростей волн Рэлея и объемной продольной упругой волны от микроискажений кристаллической решетки стали ШХ15, подвергнутой закалке и отпуска при различных температурах



Зависимости скоростей волн Рэлея и объемной продольной упругой волны от микроискажений кристаллической решетки стали 38ХН3МА, подвергнутой закалке и отпуску при различных температурах



Магнитоупругий метод оценки микронапряжений

Т. 17. Журнал экспериментальной и теоретической физики. Вып. 12
1947

ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА НАЧАЛЬНУЮ ОБРАТИМУЮ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

С. В. Вонсовский

Получена зависимость начальной обратимой восприимчивости ферромагнетиков $\varkappa_{ar}$ от слабых внешних напряжений. Показано, что $\varkappa_{ar}$ существенно зависит от магнитной текстуры образца и может не только монотонно возрастать или спадать, но имеет максимумы и минимумы, положение и величина которых определяются степенью жесткости образца. Сравнение с опытными данными показывает качественное согласие теории с опытом.

§ 1. Введение

По современной теории технической кривой намагничивания ферромагнетиков в области слабых магнитных полей (начальная восприимчивость) или при малых изменениях величины намагничивающего поля (обратимая восприимчивость) процесс намагничивания осуществляется путем обратимых смещений граничных слоев между соседними доменами с различной ориентацией спонтанной намагниченности. Аналогичные процессы имеют место и при наложении на ферромагнетик слабых упругих напряжений.

Вопрос о реальном существовании процессов смещения в настоящее время не вызывает сомнений. Однако при попытках построения количественной теории возникают существенные трудности.

Строение граничных слоев между доменами и процессы их смещения зависят сложным образом от структурного состояния ферромагнитного кристалла. Отсутствие достаточных сведений об этом состоянии и его резко „индивидуальный" характер для каждого данного образца делают затруднительным построение количественной теории кривой намагничивания в слабых полях. Именно поэтому установление общих закономерностей, не зависящих от случайных свойств отдельного образца, представляет интерес для развития количественной теории.

В настоящей работе исследуется вопрос о влиянии слабых упругих напряжений на начальную обратимую восприимчивость ферромагнитных моно- и поликристаллов. Условие малости напряжений позволяет получить соотношения, которые не требуют для своего вывода дополнительных модельных представлений.

В связи с общей оценкой обоснованности производимых расчетов необходимо указать, что в них не учитывается эффект магнитного взаимодействия между доменами, т. е. принимается, что повсюду выполняются условия:

$$\operatorname{div} \mathbf{I}=0, \quad \operatorname{Div} \mathbf{I}=0. \qquad (1,1)$$

В действительности (1,1) никогда точно не выполняется, это можно видеть хотя бы из факта появления порошковых фигур Акулова — Биттера на поверхности макроскопически размагниченных ферромагнитных кристаллов. Как недавно показал Лифшиц [1], нарушение (1,1) имеет место даже для идеального монокристалла. В еще большей степени надо ожидать появления магнитных полей рассеяния в случае

Модели Керстена и Кондорского (40-е годы)

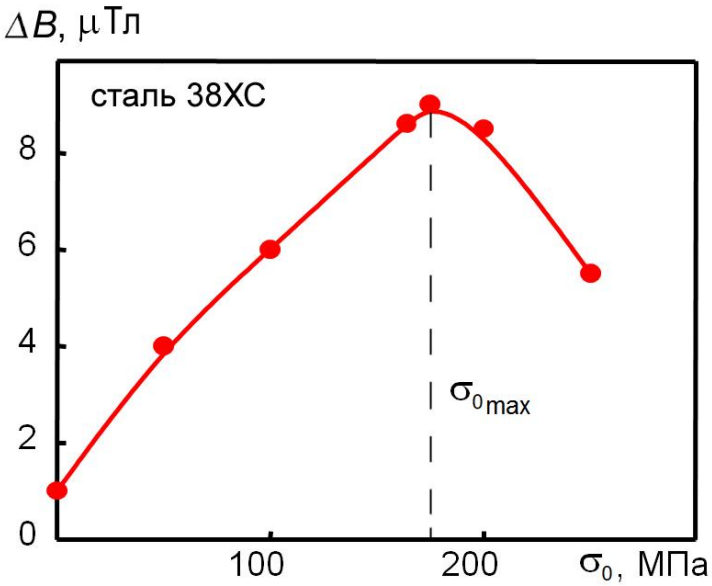
$$\mu_н - 1 = \frac{8}{9}\pi \frac{M_S^2}{\lambda \sigma_i} \qquad (1) \qquad \mu_н = \mu_н^{180} + \mu_н^{90} \qquad (2)$$

$$\sigma_i \approx \frac{200}{\mu_н - 1} \quad \text{для} \quad \mu_н^{90} > \mu_н^{180};$$

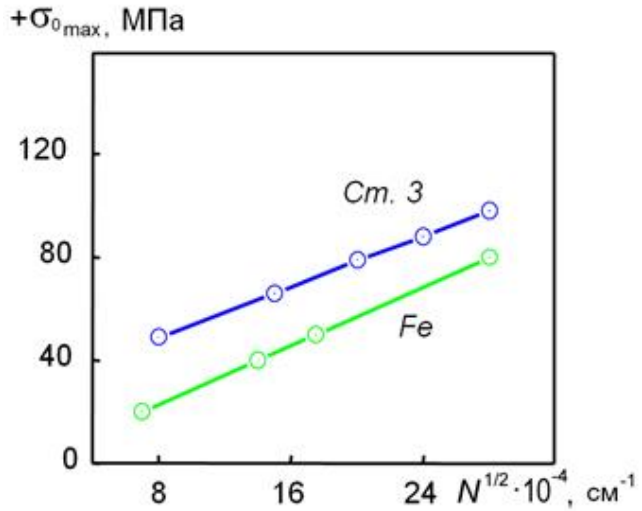
Модель Вонсовского

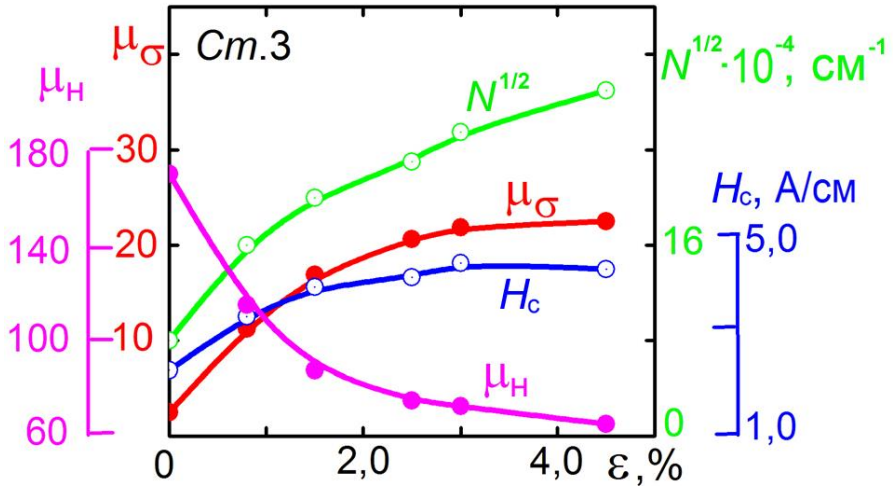
$\sigma_{max} \sim k\sigma_i$; для *Fe* k ~ 0,4; для *Ni* k ~ 2;

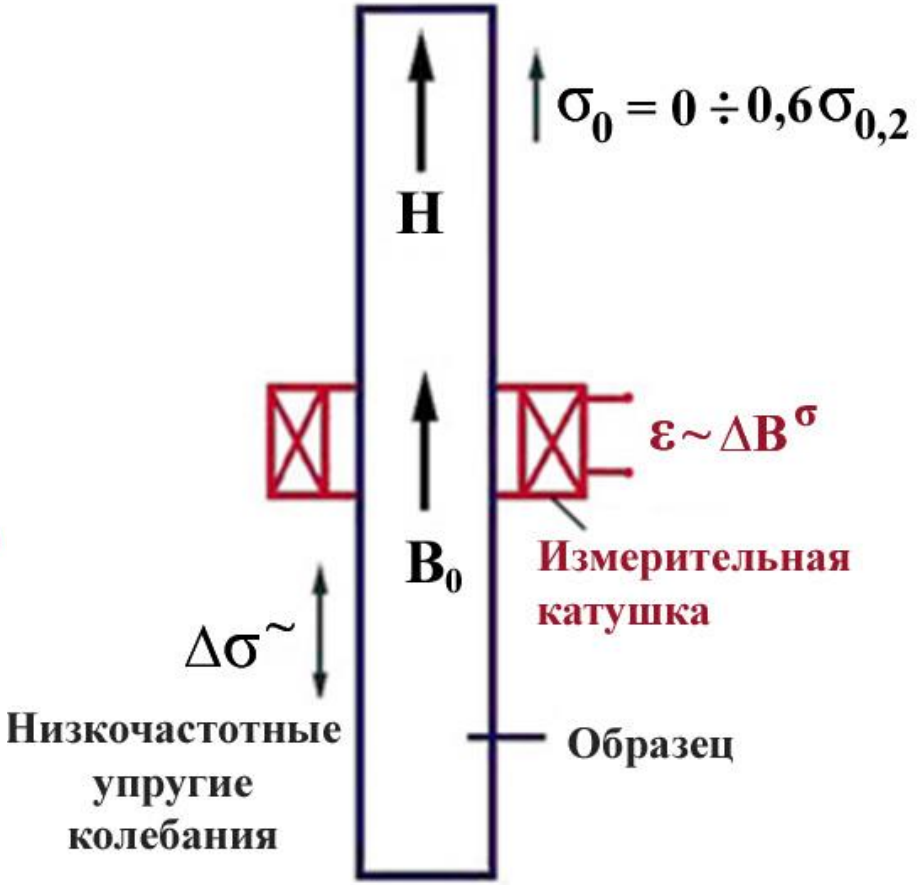
$$\Delta B = 2B_0 \frac{\lambda_{100}}{4\pi M_S^2}\left(\mu_н^{90} - 1\right)\Delta\sigma; \quad \mu_\sigma \approx k \frac{\Delta B}{\Delta\sigma B_0}$$



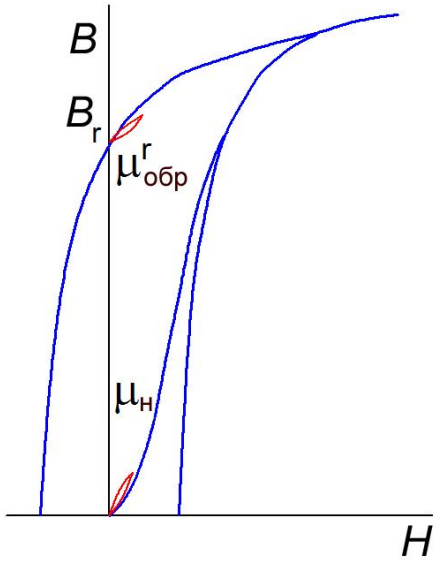
Магнитоупругий метод оценки микронапряжений

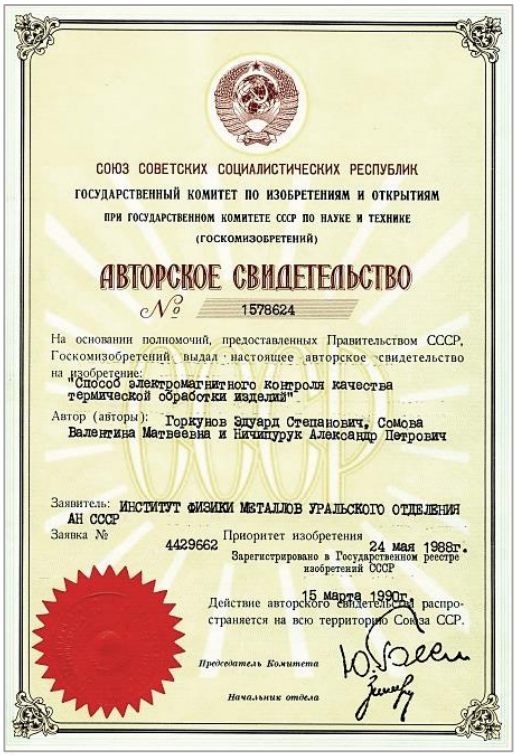






Магнитный метод оценки уровня микронапряжений




СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1578624

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Способ электромагнитного контроля качества термической обработки изделий"

Автор (авторы): Горкунов Эдуард Степанович, Сомова Валентина Матвеевна и Ничипурук Александр Петрович

Заявитель: ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

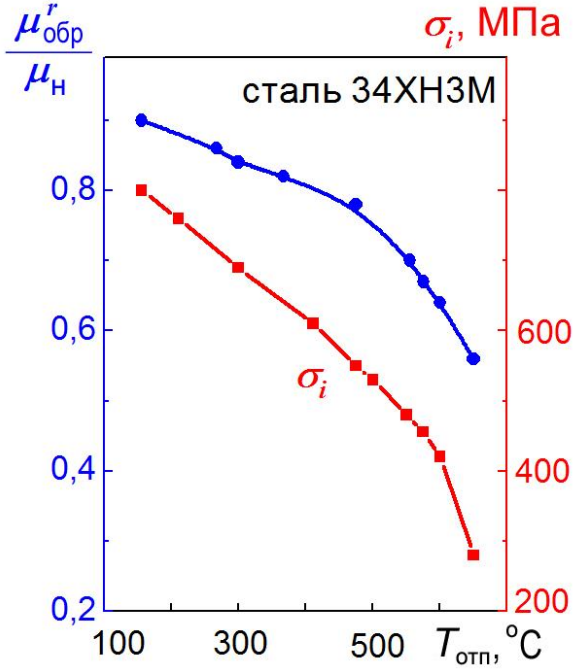
Заявка № 4429662 Приоритет изобретения 24 мая 1988г.

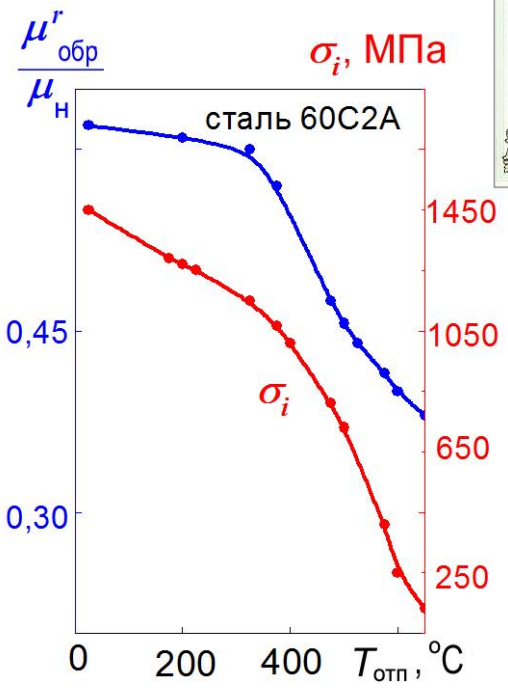
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 15 марта 1990г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

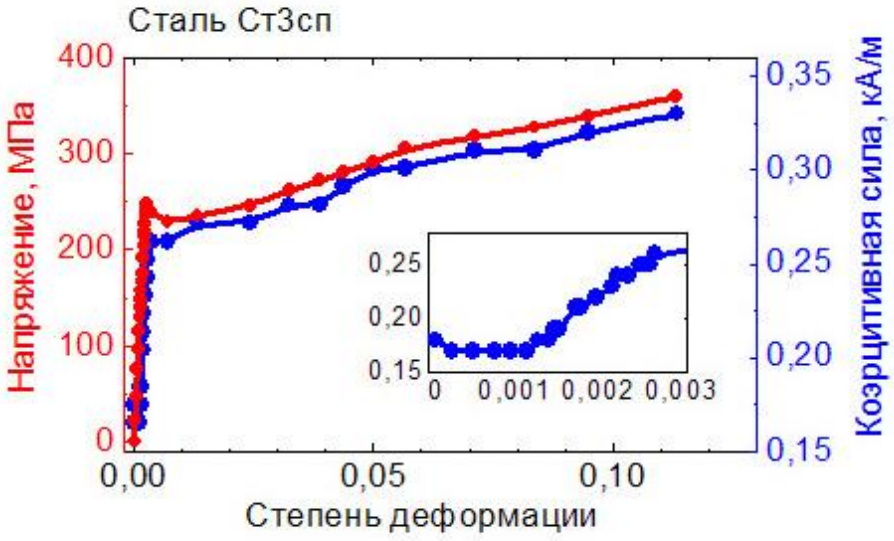
Председатель Комитета

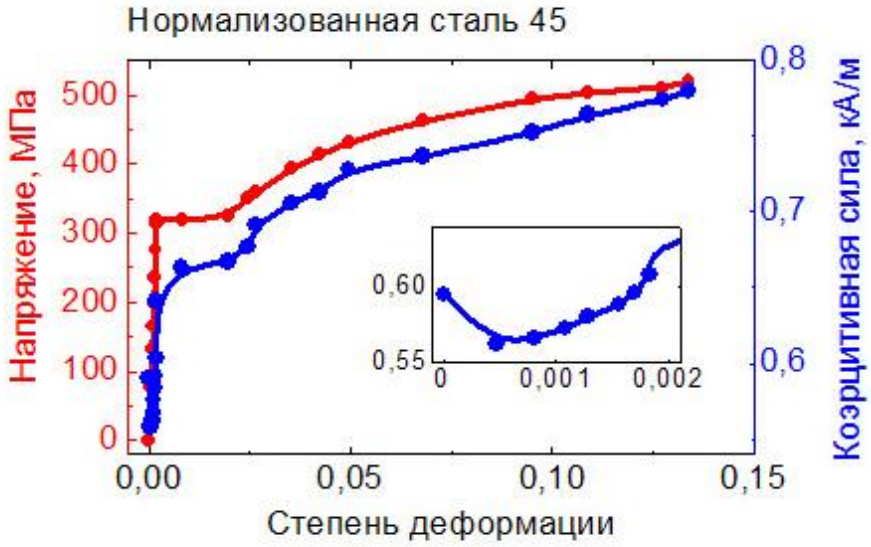
Начальник отдела

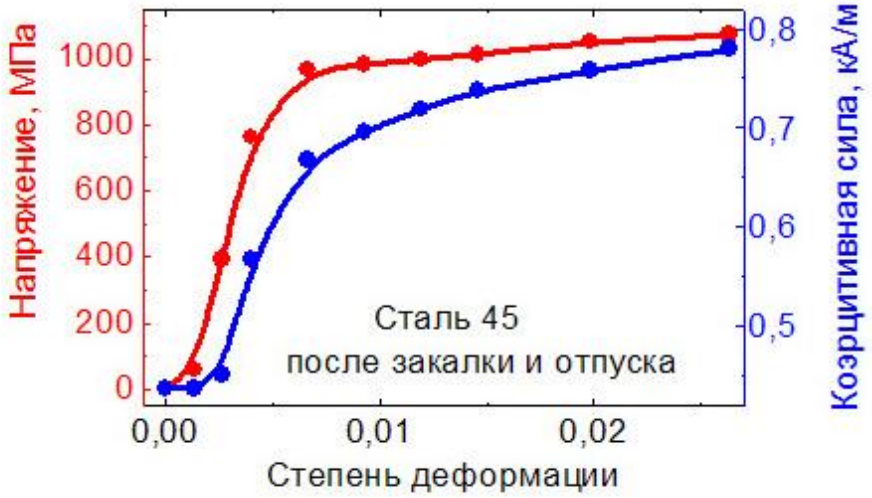




Зависимости напряжения растяжения и коэрцитивной силы от степени деформации для углеродистых сталей







Ультразвуковые методы оценки упругих и пластических деформаций (акустоупругость)

Закон Гука выполняется приближенно. Более точная зависимость имеет вид степенного ряда:

$$\sigma = \mathrm{E}\varepsilon + \beta_\sigma \varepsilon^2. \qquad (1)$$

Зависимость скорости объемных УЗ волн от напряжений, в общем виде можно записать:

$$\mathrm{c}_\sigma^2 = \mathrm{c}_0(1 + \beta_\sigma \sigma) \qquad (2)$$

или, преобразовывая (2)

$$\Delta\mathrm{c} + \Delta\mathrm{c}^2 = \beta_\sigma \sigma, \qquad (3)$$

где $\Delta\mathrm{c} = \frac{\mathrm{c}_\sigma - \mathrm{c}_0}{\mathrm{c}_0}$ - относительная скорость у.з. волн. Нелинейность этого выражения определяется квадратичным членом левой его части. Степени выше второй не учитывают. Это выражение упрощенное, не учитывающее наличия и взаимодействия деформаций разного типа.

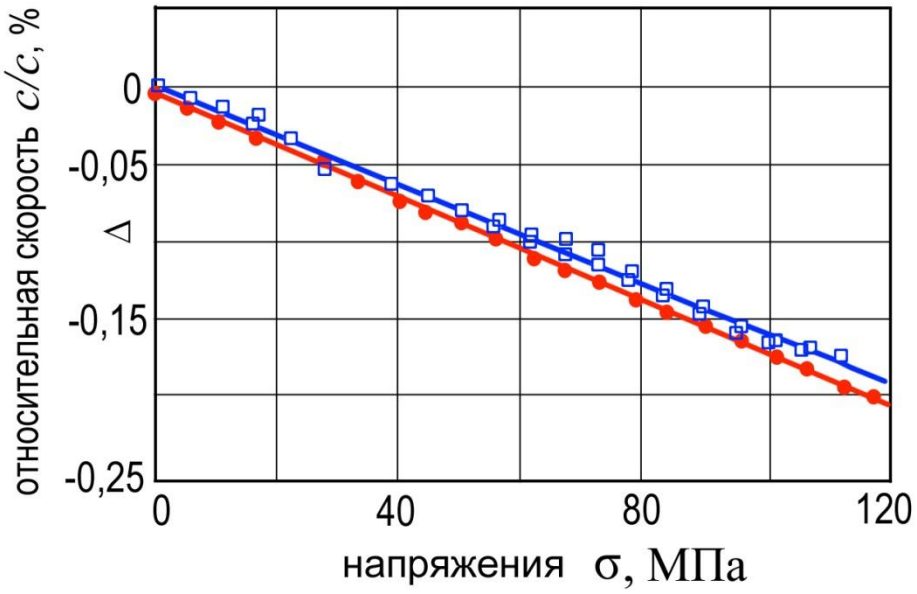
Коэффициенты типа E называют упругими постоянными или модулями упругости, а коэффициенты типа β_σ (в изотропном твердом теле их три) обычно называют *коэффициентами Мурнагана* или другими терминами. Обычно (1-3) рассматриваются упрощенно:

$$\Delta\mathrm{c}/\mathrm{c} = \varepsilon \boldsymbol{\beta_\sigma} / \mathrm{E} \approx \sigma \boldsymbol{\beta_\sigma} / \mathrm{E}^2 \qquad (4)$$

Изменение скорости пропорционально деформации или напряжению в контролируемом объекте. Связь между ними определяется *акустоупругим коэффициентом* $\boldsymbol{\beta_\sigma}$, величина которого зависит от типа УЗ волн, их поляризации и направления распространения относительно деформирующей силы.

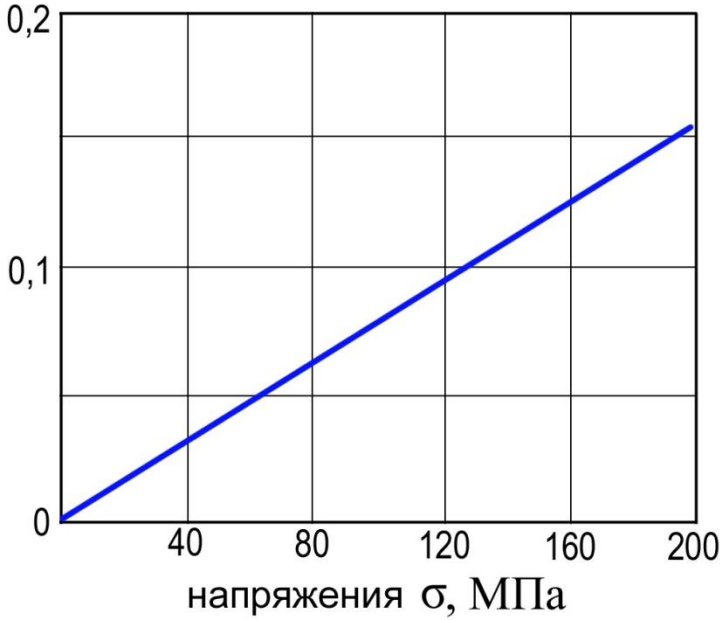
Влияние напряжений растяжения и сжатия на изменения относительных скоростей

Величина изменения скорости $\Delta c/c$ имеет порядок 10^{-4}, т.е. 0,01%.
При деформации растяжения скорость уменьшается, а при деформации сжатия – увеличивается. В области пластических деформаций скорость остается практически постоянной.



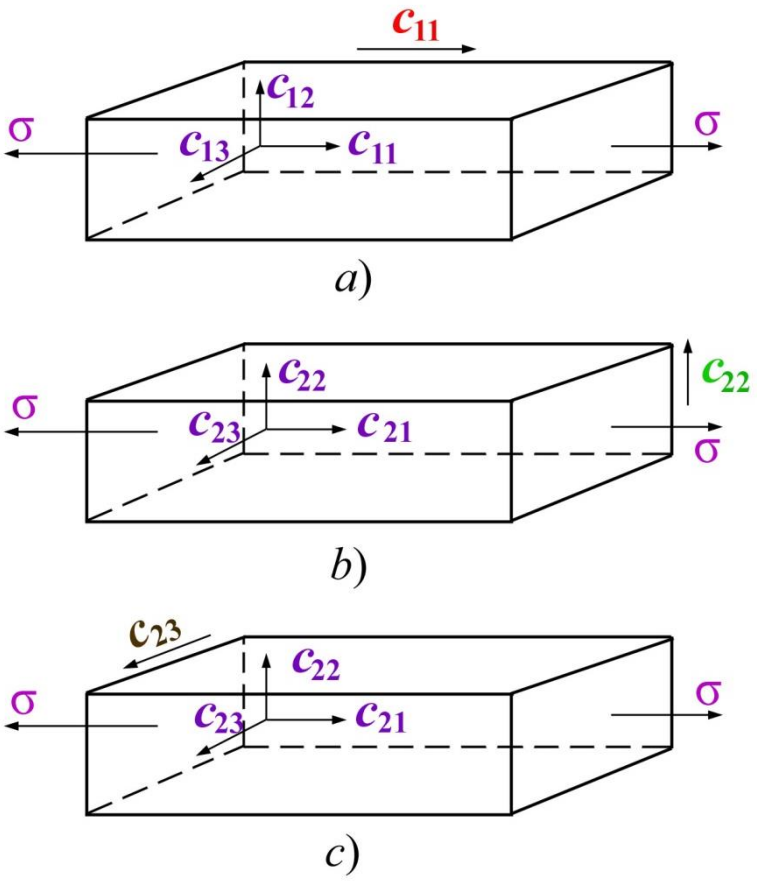
Влияние напряжений растяжения для стали 45 на величину относительной скорости

● - непрерывные, ▫ - импульсные измерения

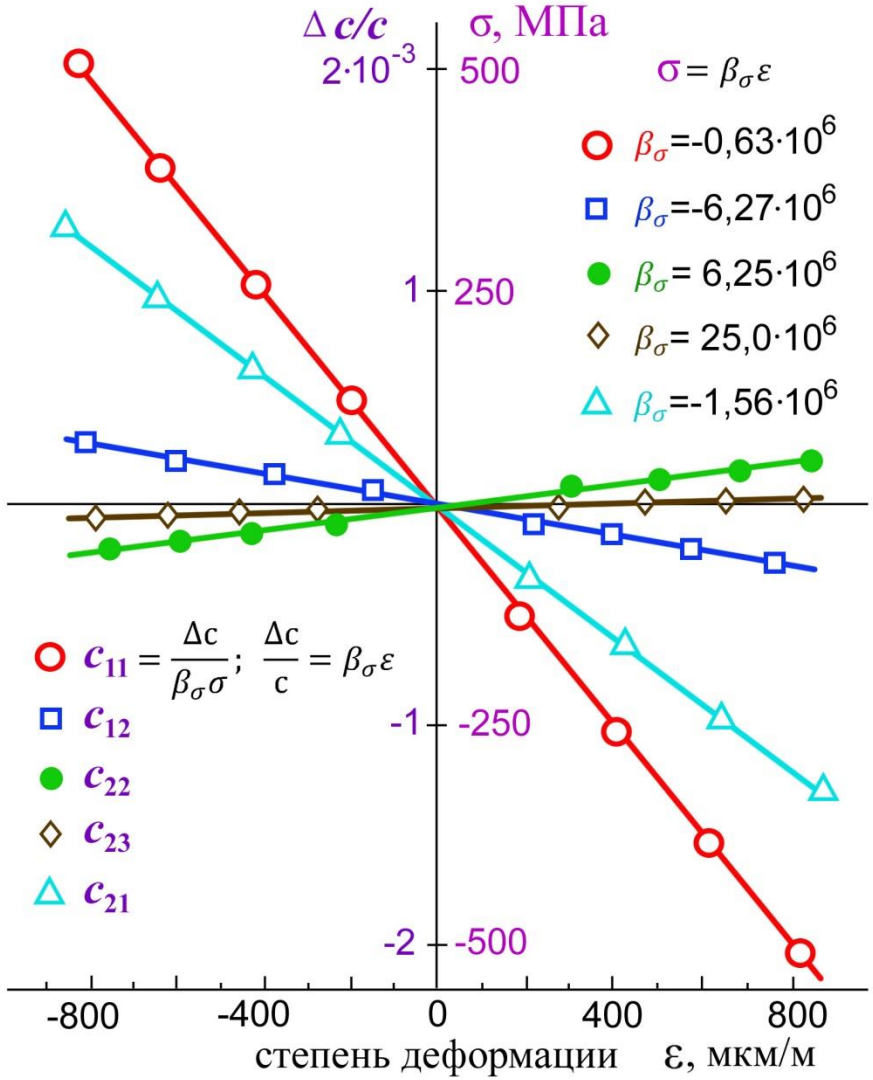


Влияние напряжений сжатия для стали 45 на величину относительной скорости

Относительное изменение скорости в зависимости от деформации для разных вариантов



Направления распространения различных плоских волн при действии напряжений



Влияние усталостных изменений при циклических испытаниях на УЗК параметры

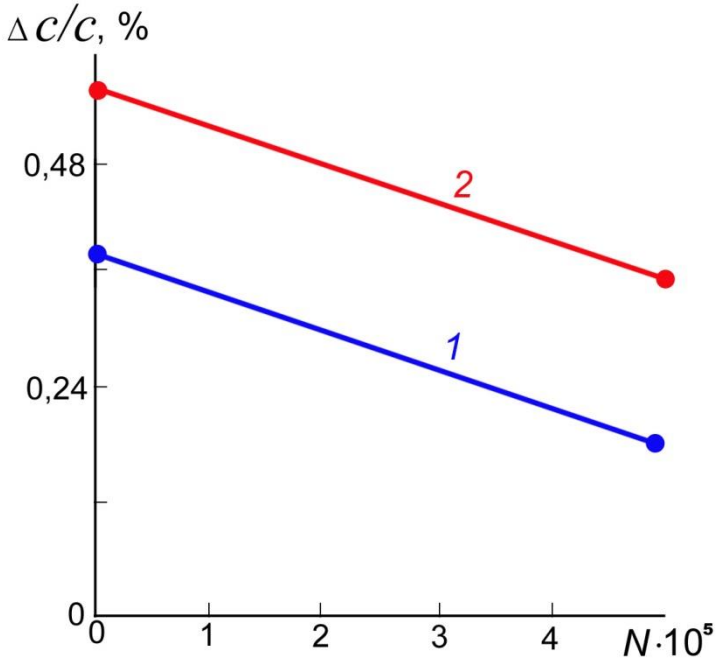
Детали машин в процессе эксплуатации подвергаются действию переменных механических нагрузок, которые являются причиной усталостных изменений структуры металла и накопления микродефектов, макродефектов, зарождения трещин и разрушения изделия.

Для решения такой задачи можно воспользоваться акустическим методом, основанным на изменении скорости звука в металле в зависимости от структуры и накопления микродефектов при эксплуатации под воздействием циклически меняющихся нагрузок.

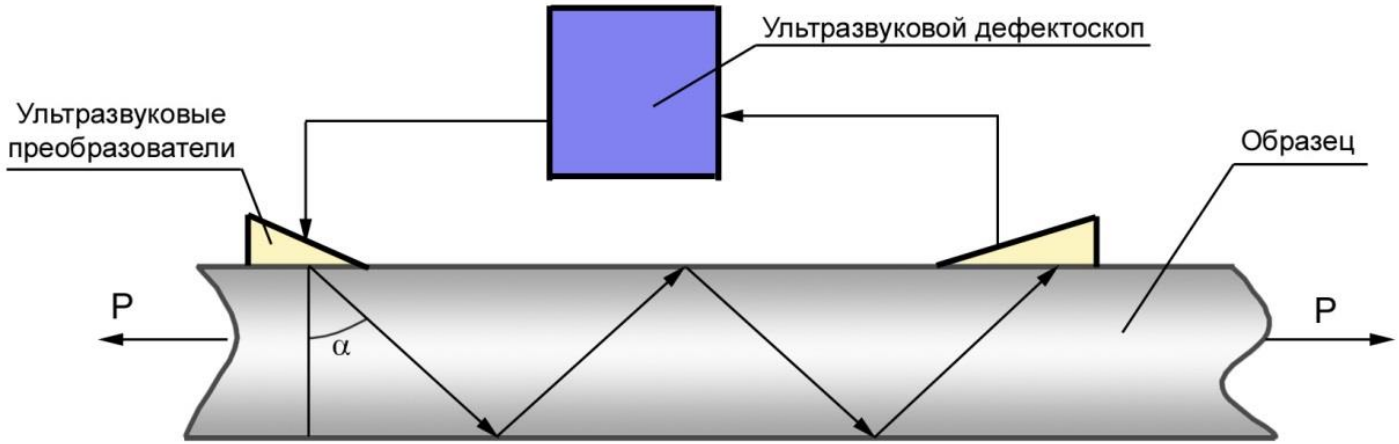
Скорость распространения ультразвука измеряли по принципу автоциркуляции импульсов.

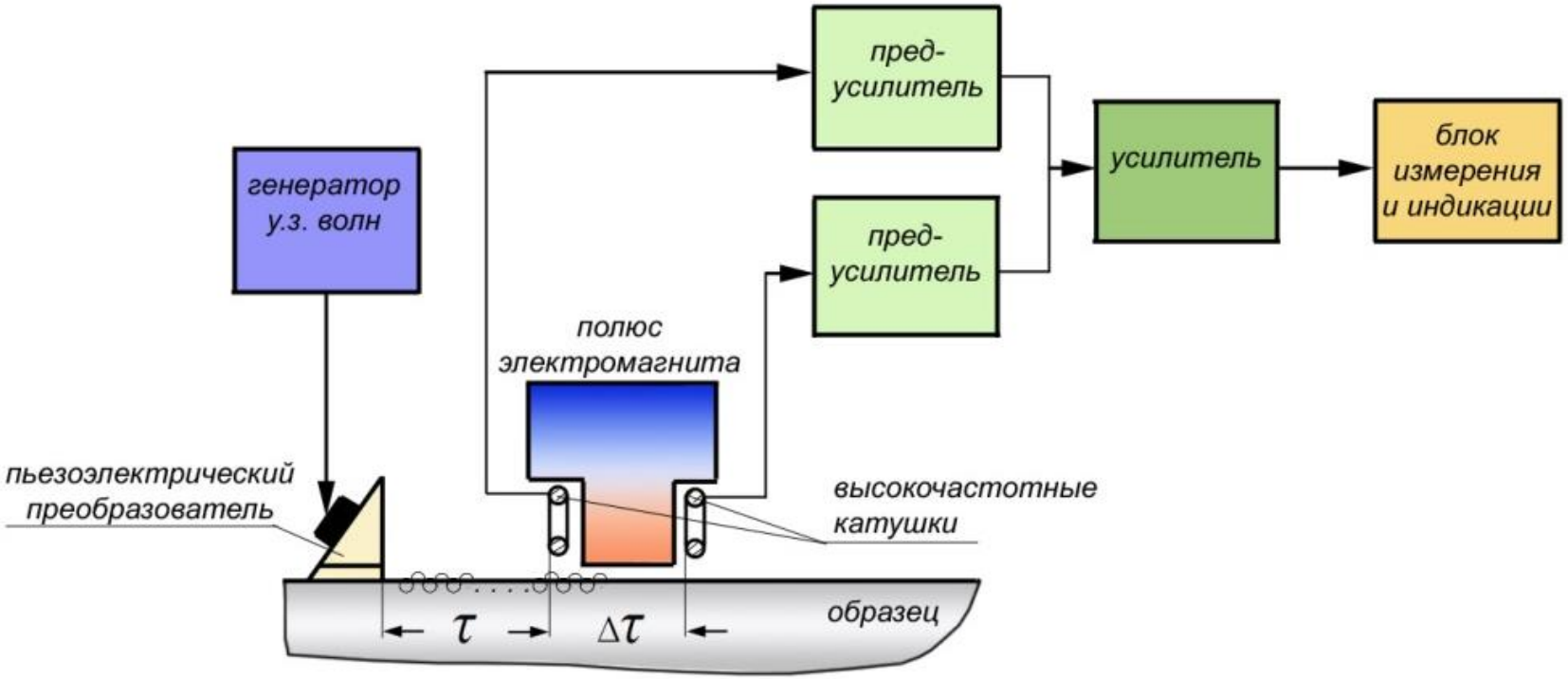
Ультразвуковой импульс прошедший между двумя пьезопреобразователями преобразуется в приемном пьезопреобразователе в электрический сигнал, который, в свою очередь, запускает следующий ультразвуковой импульс.

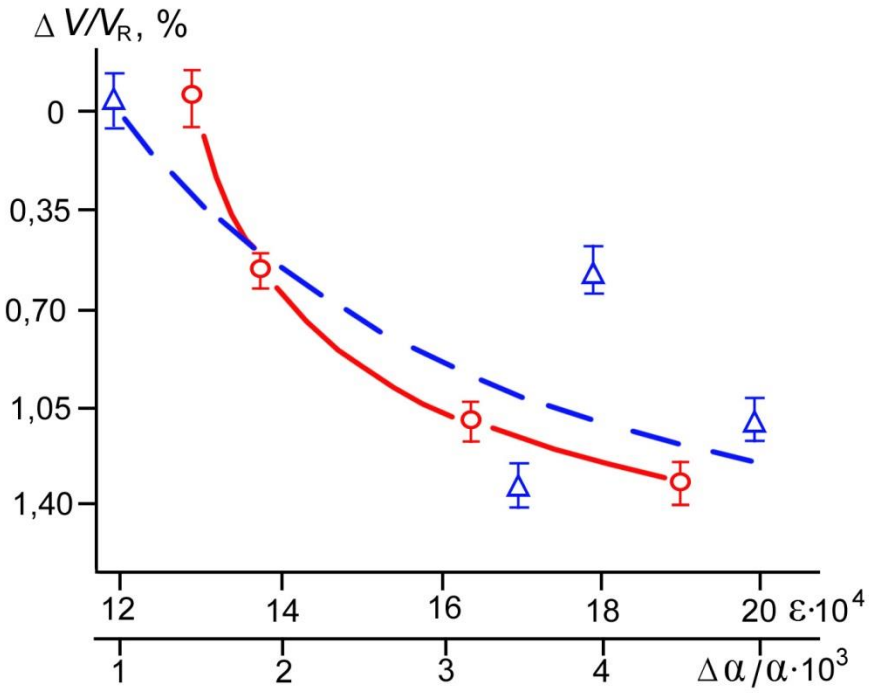
Показано, что (В.В. Муравьев) с ростом числа циклов приложенных напряжений (320 МПа) скорость волн в образце уменьшается.



Изменение относительной скорости волн Релея вдоль (***1***) и поперек (***2***) приложения от нулевой циклической нагрузки для стали 45


Ультразвуковой дефектоскоп
Ультразвуковые
преобразователи
Образец
P
P
α


пред-
усилитель
пред-
усилитель
усилитель
блок
измерения
и индикации
генератор
у.з. волн
полюс
электромагнита
пьезоэлектрический
преобразователь
высокочастотные
катушки
τ
Δτ
образец


Δ V/V_R, %
0
0,35
0,70
1,05
1,40
12
14
16
18
20 ε·10^4
1
2
3
4
Δα/α·10^3