



«Электротехнические материалы»

Лабораторная работа №5

Доцент Дощечкина И.В.
Доцент Лалазарова Н.А.

Lab_5_1MM_el_mat_LNA_09-04-2015

Лабораторная работа №5

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы - экспериментально определить влияние холодной пластической деформации на структуру и свойства электротехнических материалов, изучить изменение микроструктуры и свойств холоднодеформированного металла в процессе последующего нагрева.

Приборы и материалы:

Цилиндрические образцы меди и стали 10
отожжённом состоянии.

Гидравлический пресс.

Штангенциркуль,
Твердомер Роквелла.

Металлографический микроскоп.

Лабораторные электропечи.

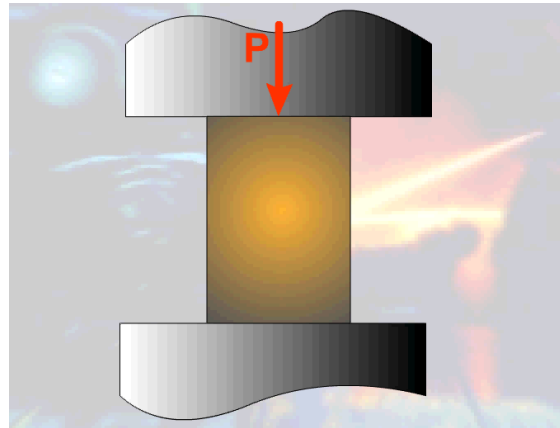
Микрошлифы образцов меди и стали 10 в отожжённом,
деформированном состоянии и после нагрева.



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Деформация - это изменение размеров и формы твердого тела под воздействием внешних сил или в результате разных физико-механических процессов, которые происходят в самом теле (аллотропическое превращение, перепад температур, разность объемов отдельных фаз сплава, магнитострикция при намагничивании ферромагнитных материалов и т. д.).

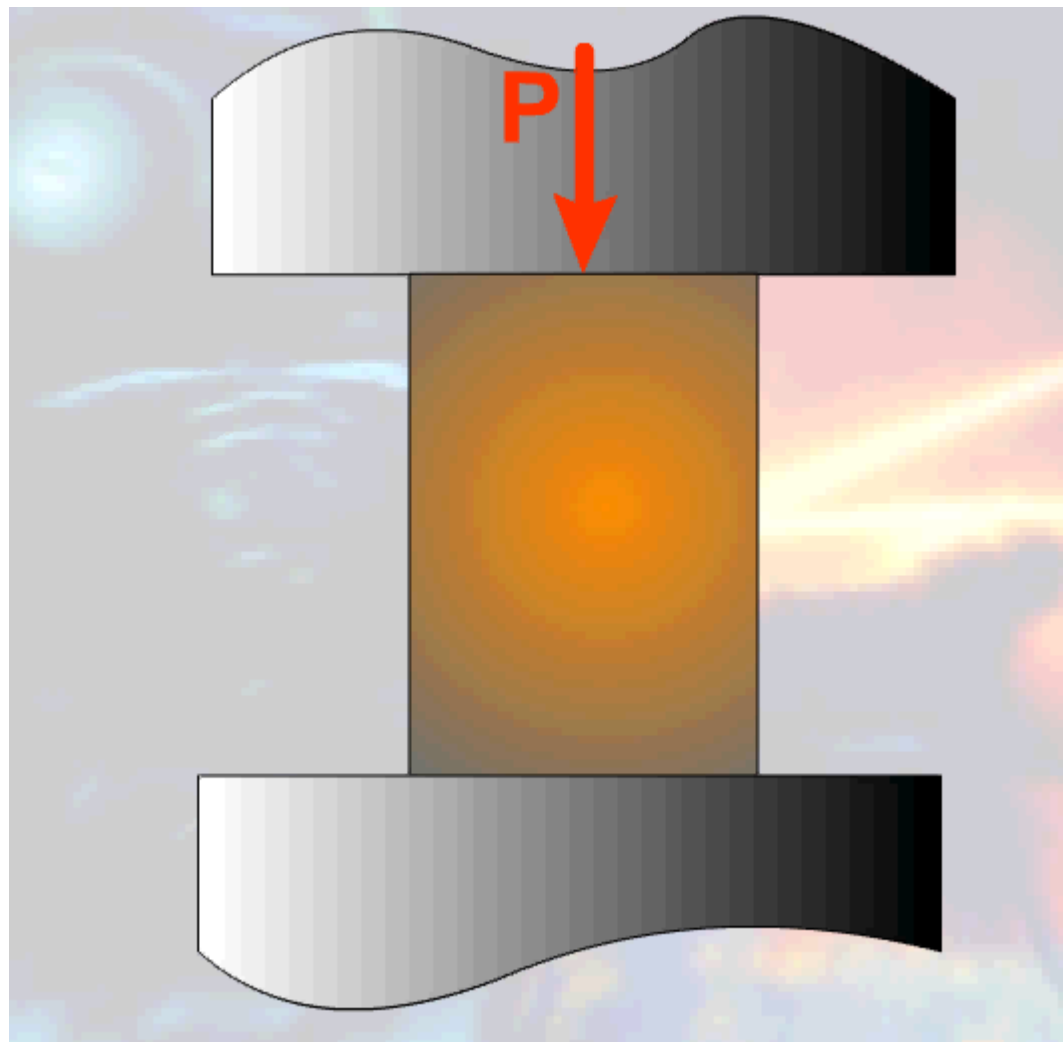
Различают **упругую и пластическую деформацию**. **Упругая** деформация исчезает после снятия нагрузки и не вызывает заметных остаточных изменений в структуре и свойствах металла.



Упругая деформация

Пластическая деформация после снятия нагрузки остаётся и приводит к изменениям структуры металла, следовательно, и его свойств.

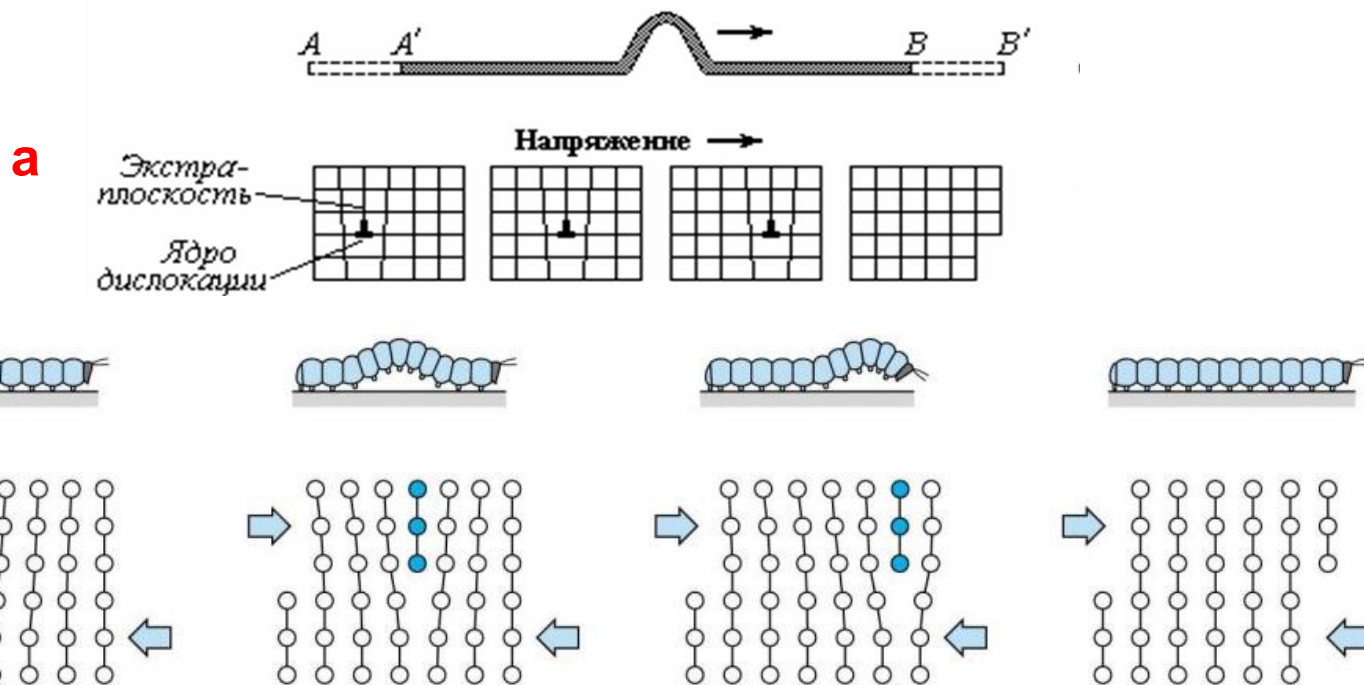
В реальных металлах и сплавах пластическая деформация осуществляется путем последовательного перемещения линейных дефектов - **дислокаций**. Под и влиянием действующего напряжения дислокация легко скользит от одной атомной плоскости к другой.



Пластическая деформация

СХЕМЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Пластическая деформация – результат движения дислокаций. Складка ковра (а) и перемещение гусеницы (б) – модели скольжения дислокации.

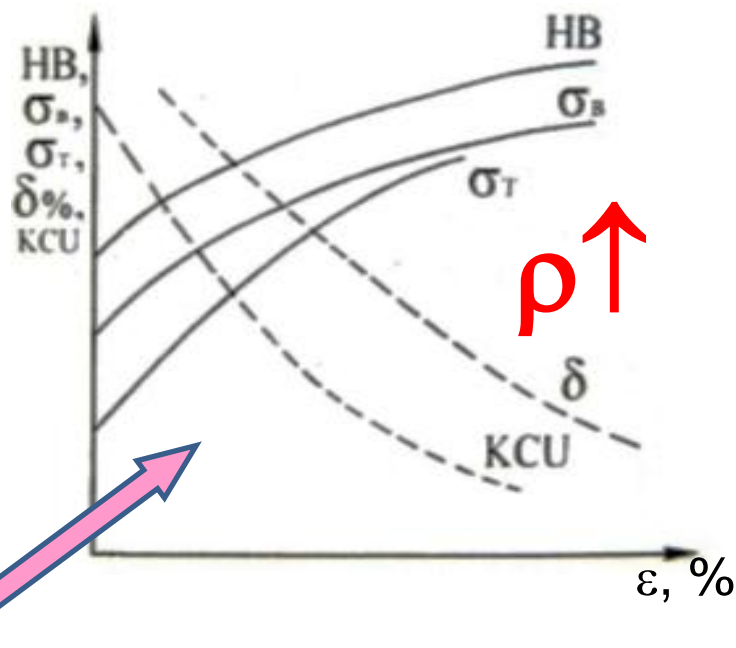


В результате деформации значительно увеличивается концентрация точечных дефектов (вакансий и межузельных атомов) и на три - пять порядков повышается плотность дислокаций, которая достигает $10^{11} \dots 10^{12}$ (до деформации плотность дислокаций была в пределах $10^6 \dots 10^8$).

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

При холодной пластической деформации плотность дислокаций повышается до $10^{11} \dots 10^{12}$ (до деформации она была в пределах $10^6 \dots 10^8$). При увеличении плотности дислокации становятся малоподвижными, что приводит к упрочнению металла и снижению его пластичности.

С повышением степени деформации ε прочность (σ_B , $\sigma_{0,2}$) и твердость (HB) металла повышаются,

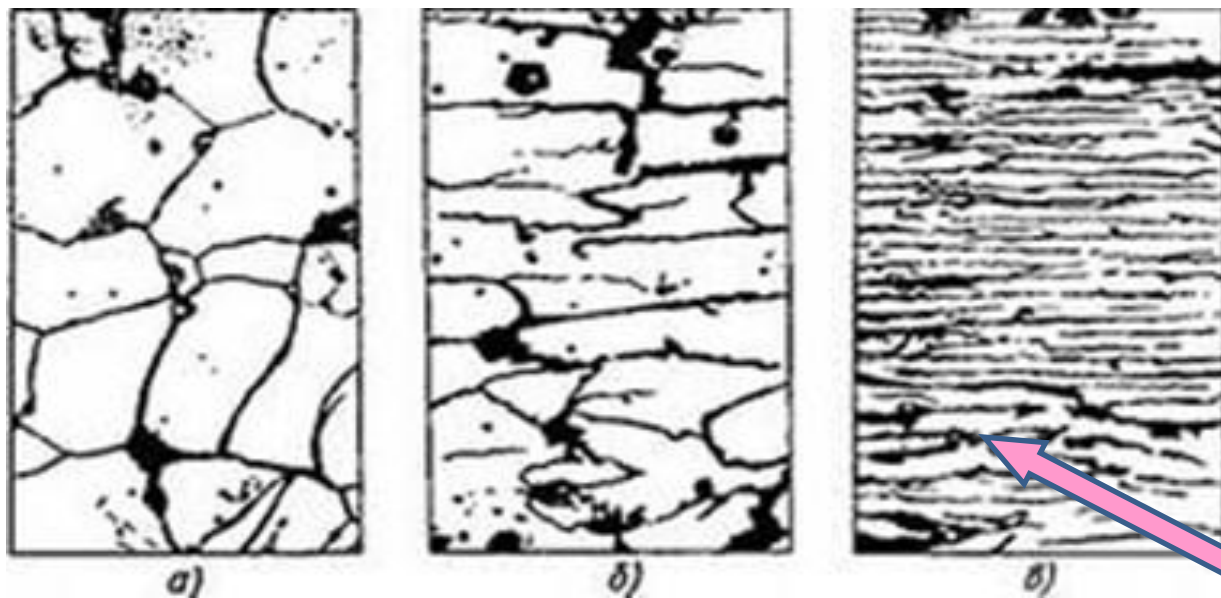


но в то же время характеристики пластичности (δ , ψ) и ударная вязкость (KCU) уменьшаются.

Упрочнение металла под воздействием холодной пластической деформации называется наклёпом или нагартовкой. Это явление называют еще деформационным упрочнением.

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

Пластическая деформация не только искажает кристаллическую решетку, но и изменяет микроструктуру - **приводит к повороту всех зерен и их ориентации** в направлении максимальной деформации.

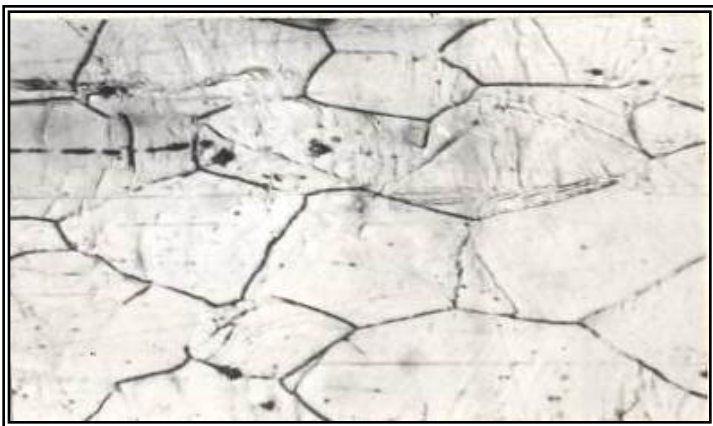


а – до деформации;
б – после **обжатия на 35%**;
в – после **обжатия на 90%**.

После **деформации 90-95%** все зерна **ориентированы** в направлении течения металла (так ориентированы плоскости легкого скольжения во всех зернах).

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

Закономерная ориентация плоскостей кристаллической решетки в разных **зернах** под воздействием **пластической деформации** называется **текстурой деформации**.



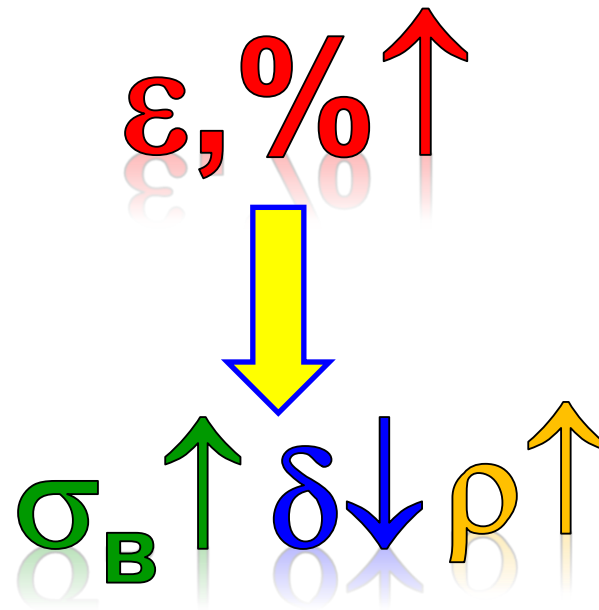
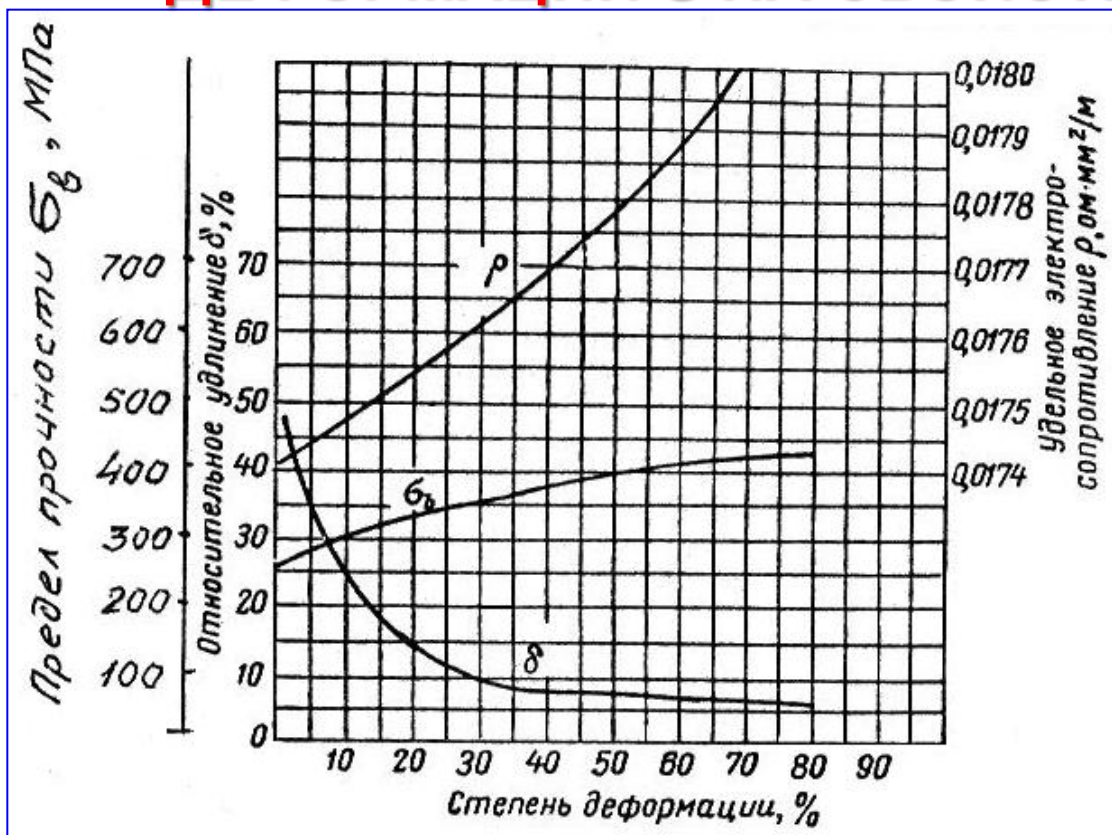
До деформации



Текстура после деформации

Текстура приводит к **анизотропии свойств**, т.е. зависимости их от направления. В металле с произвольной ориентацией зерен (до деформации) свойства одинаковые во всех направлениях (**изотропия**). Для металлов и сплавов, с особыми физическими свойствами и когда необходимо в определенном направлении улучшить какие-то электрические или магнитные характеристики, **анизотропия играет большое практическое значение**.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ϵ НА СВОЙСТВА МЕДИ М1

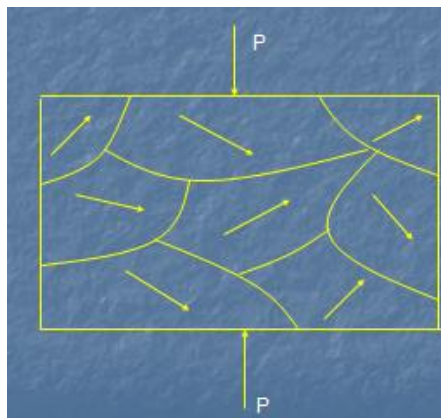


Прочность σ_B меди в результате холодной пластической деформации со степенью 70...80 % увеличивается в 1,5...1,7 раза. Однако при этом резко снижается пластичность, в 2,5 раза возрастает электросопротивление ρ , уменьшается коррозионная стойкость и плотность металла.

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

В холоднодеформованном металле с повышением степени деформации резко уменьшается способность к пластической деформации, существенно ухудшается сопротивление коррозии,

снижаются электро-сопротивление и магнитная проницаемость, растёт коэциктивна сила и, как следствие, увеличиваются потери на гистерезис.



Для снятия наклёпа, улучшения электрических и магнитных характеристик,

а также возвращения всех свойств металла к уровню перед деформацией, холоднодеформированный металл необходимо **нагреть**.

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

В зависимости от температуры нагрева в наклепанном металле происходят различные структурные превращения. Основные процессы – **возврат** и **рекристаллизация**.

При нагревании до сравнительно невысоких температур (ниже $0,2...0,3 T_{пл}$) начинается процесс возврата.

Под **возвратом** понимают повышение структурного совершенства деформированного металла за счет уменьшения концентрации точечных дефектов и перераспределения дислокаций.

При этом в структуре сохраняются деформированные зерна (без зарождения новых) и высокая плотность дислокаций.

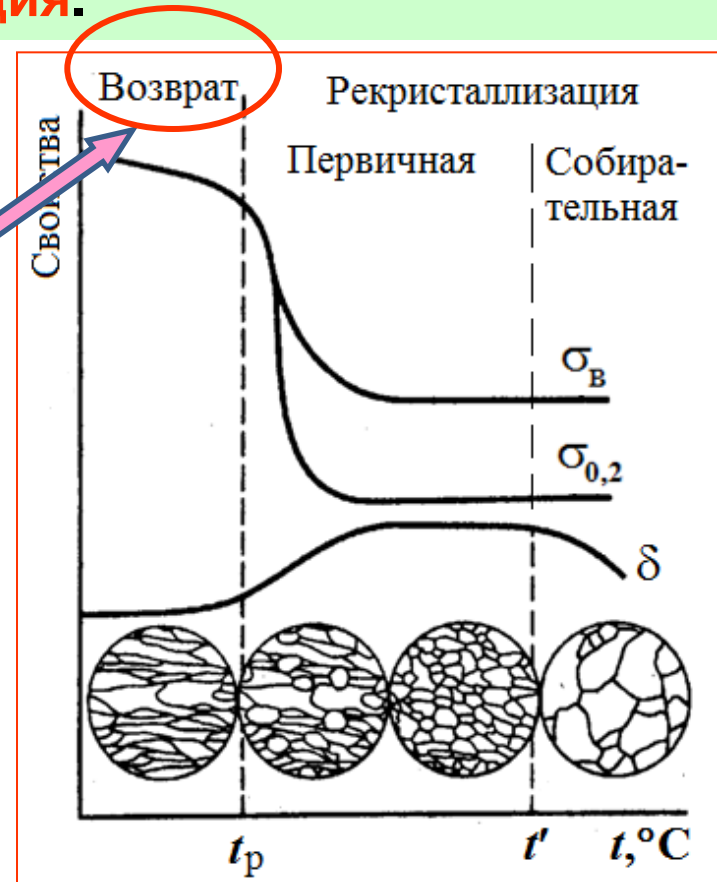
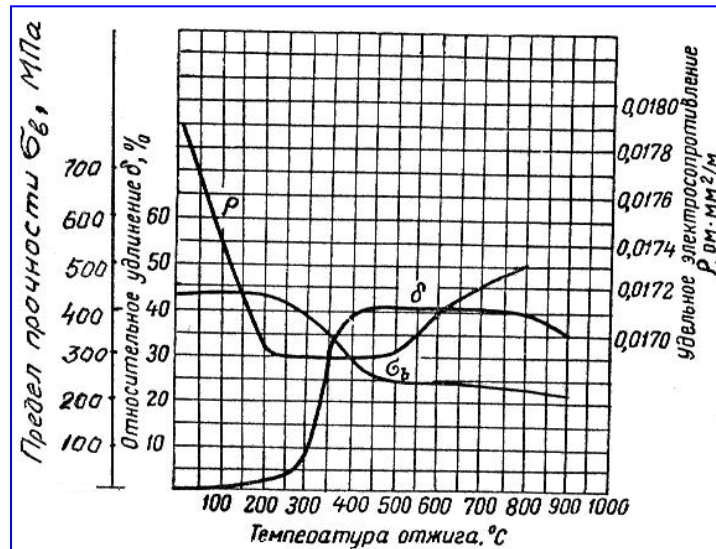


Схема изменения структуры и механических свойств наклепанного металла при нагреве

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

В результате возврата механические свойства (прочность, твердость, пластичность, ударная вязкость) практически не изменяются.

В то же время электросопротивление, которое очень зависит от концентрации точечных дефектов, значительно снижается и повышается магнитная проницаемость.



Последующее повышение температуры нагрева (более 0,35 $T_{пл}$) увеличивает подвижность атомов,

Изменение механических свойств и удельного электросопротивления холоднодеформированной меди М1 в зависимости от температуры нагрева (степень деформации $\varepsilon=75\%$)

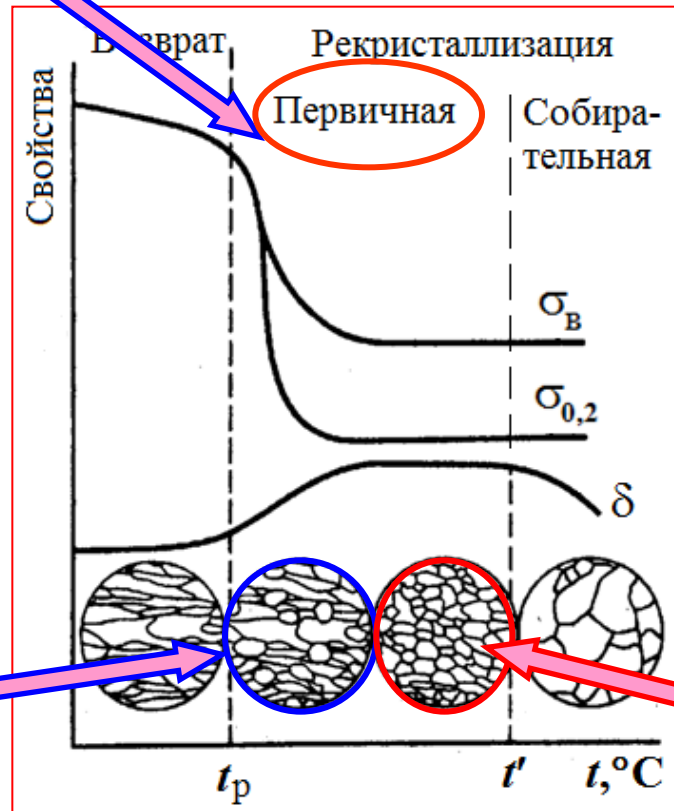
что приводит к существенным изменениям как структуры, так и свойств металла.

Влияние нагрева на структуру и свойства холоднодеформированного металла

При достижении определенной температуры (T_p) начинаются процессы **первичной рекристаллизации** - образование и,

рост новых
равновесных с
неискажённой
решёткой внутри
деформиро-
ванных **зёрен.**

Образование
новых зёрен

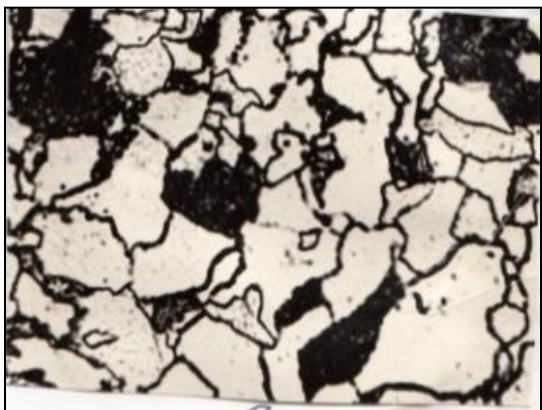


При этом **умень-**
шается плотность
дислокаций с
 $10^{11} \dots 10^{12}$ до
 $10^6 \dots 10^8$ см^{-2} и
полностью **сни-**
маются внутрен-
ние напряжения
металла.

Рост новых
зёрен

Эти структурные изменения приводят к **снятию наклёпа** — снижению прочности и твердости и значительному повышению пластичности. Электросопротивление при этом снижается.

Структура стали



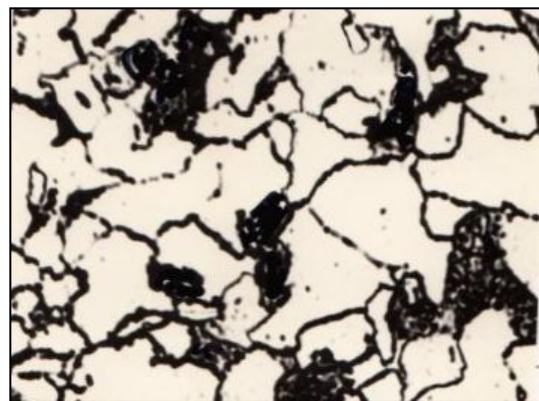
Структура стали до деформации



Структура стали после деформации



Структура стали после первичной рекристаллизации (отжига)



Структура стали после собирательной рекристаллизации

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

Температура T_p , при которой происходит **первичная рекристаллизация** и, как следствие, упрочнение металла и приближение всех свойств к исходным значениям (до деформации), называется **температурой начала рекристаллизации**. Эта температура определяется по формуле:

$$T_p = a \cdot T_{пл}, \text{ K}$$

где a - коэффициент, зависящий от химического состава сплава;

$T_{пл}$ ~ абсолютная температура, К.

Чем выше чистота металла, тем ниже температура рекристаллизации. Для большинства технических сплавов $a = 0,4$; для очень чистых металлов $a = 0,2$.

Так у алюминия, особенно высокой чистоты (99,999%) температура рекристаллизации 20°C , у технического алюминия (99,9 %) - 100°C . Для сложных по химическому составу и структуре сплавов $a = 0,8$.

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

Температура рекристаллизации зависит от **степени деформации** и **скорости нагрева**.

Чем меньше степень наклепа и больше скорость нагревания деформированного металла, тем выше температура рекристаллизации.



Холодная пластическая деформация

По соотношению температуры деформации и температуры рекристаллизации различают **холодную** и **горячую** деформацию.

Холодная деформация осуществляется при температуре ниже температуры рекристаллизации, и приводит к упрочнению (наклепу) металла.

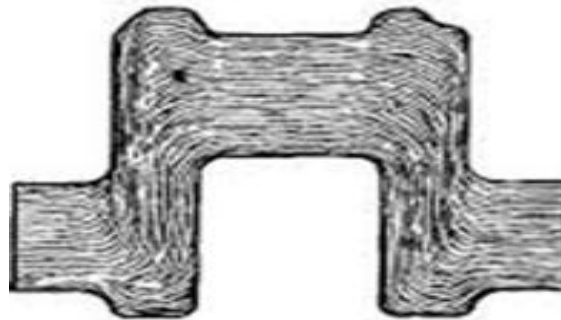
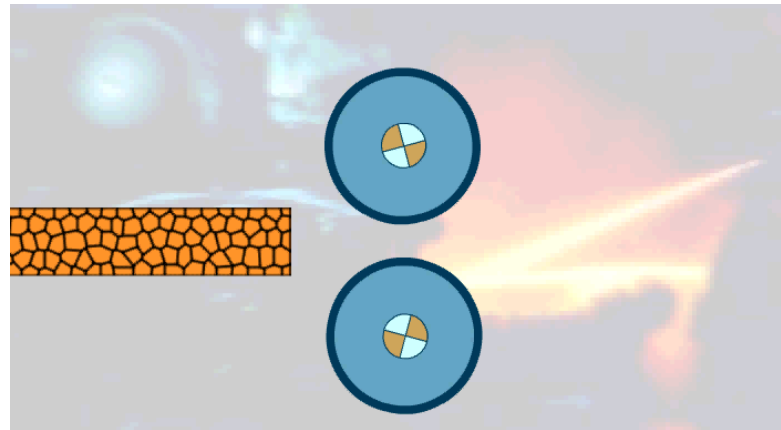
Для снятия наклепа применяют специальную термическую обработку – **рекристаллизационный отжиг**.

Температура $t_{p0} = t_p + (100...150)^\circ\text{C}$. После необходимой выдержки металл охлаждают с печью.

ГОРЯЧАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Горячая деформация осуществляется при температуре, выше температуры рекристаллизации, и поэтому упрочнение металла не происходит.

В горячедеформированном металле образуется **волокнистая структура** – результат вытянувшихся в строчку неметаллических включений, раздробленных дендритов, ликвационных зон.



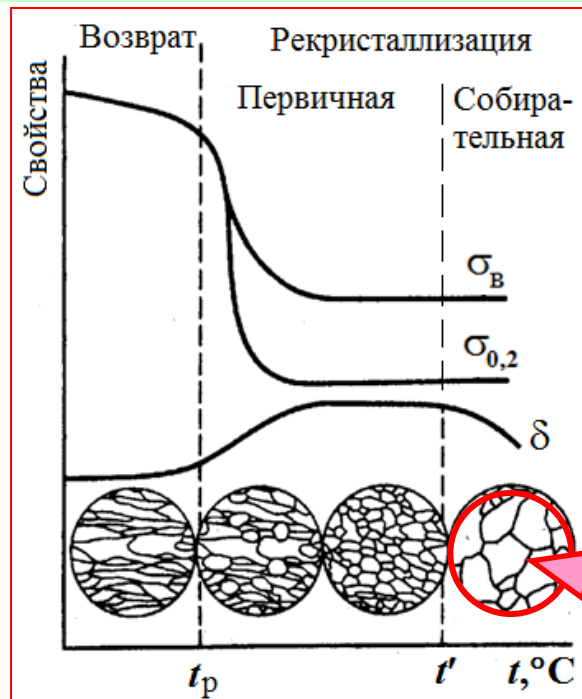
Волокнистая структура вызывает **анизотропию свойств**.

Волокно при штамповке коленвала должно повторять контур детали

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

После завершения первичной рекристаллизации при последующем повышении температуры происходит рост мелких рекристаллизованных зерен, поглощение одних зерен другими и их объединение в более крупные. Процесс укрупнения рекристаллизованных зерен - это так называемая **собирательная рекристаллизация**.

С повышением температуры рост зерен ускоряется, и они становятся все крупнее. Поэтому нагревание меди до температур 500...800 °С практически не изменяет механические свойства.



Но нагрев выше 850°С приводит к образованию очень больших зерен, следствием чего есть снижение и прочности, и пластичности

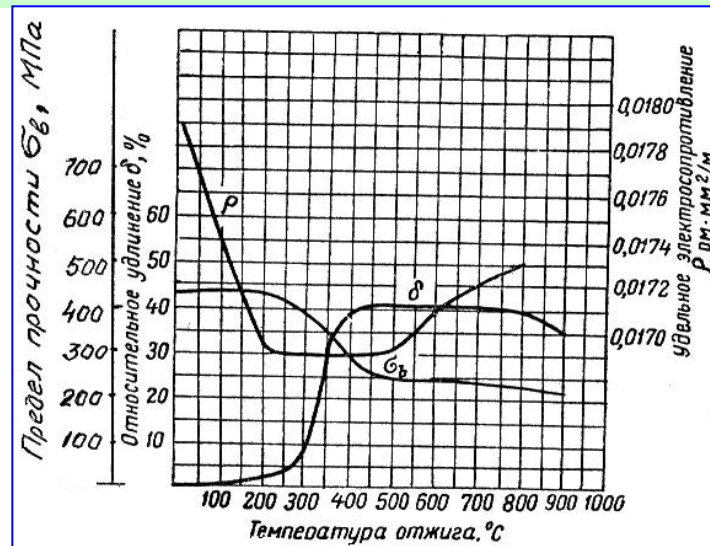
Собирательная рекристаллизация

Если для материала главными являются электрические и магнитные свойства, наличие больших зерен способствует уменьшению коэрцитивной силы и потерь на гистерезис, повышению магнитной проницаемости.

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

Для некоторых металлов и сплавов высокие температуры нагревания (900...1200 °С) холоднодеформированного металла с большими степенями обжатия (от 60 до 90 %) и при наличии текстуры деформации приводят к росту зерен с подавляющей кристаллографической ориентацией.

Кристаллографическая ориентация, которая появляется в процессе нагревания холоднодеформированного металла, называется **текстурой рекристаллизации**.



Как и текстура деформации, текстура рекристаллизации также приводит к анизотропии свойств.

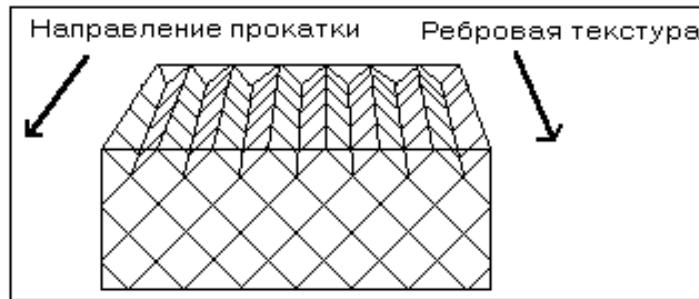
Изменение механических свойств и удельного электросопротивления холоднодеформированной меди М1 в зависимости от температуры нагрева (степень деформации $\varepsilon=75\%$)

Это явление используют в промышленности для получения электротехнических материалов с нужными свойствами в определённом направлении.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕКСТУРЫ

Наличие и характер текстуры рекристаллизации зависит от степени предыдущей деформации и температуры нагрева. Например, текстурированную анизотропную медь можно получить после холодной деформации со степенью деформации свыше 60 % и последующего отжига при температуре 900...1000 °С.

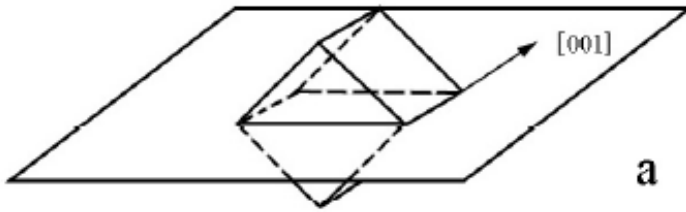
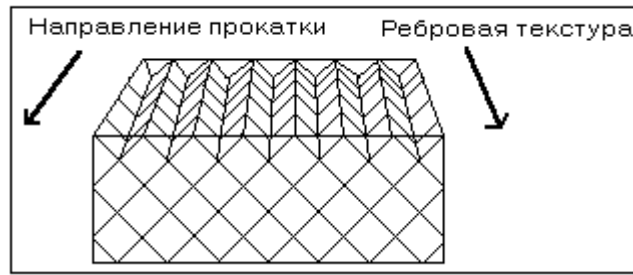
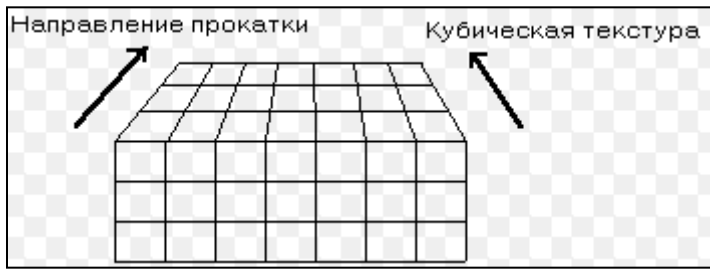
Наиболее высокопрочную электротехническую трансформаторную сталь получают после прокатывания листа с деформацией 75...80 %



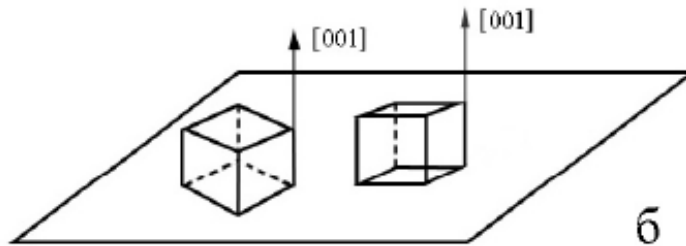
При ребровой текстуре наилучшие магнитные свойства получаются в направлении прокатки, наихудшие - под углом 55° к направлению прокатки.

и последующего отжига в атмосфере водорода при 1000...1200 °С для снятия наклёпа и укрупнения зерен.

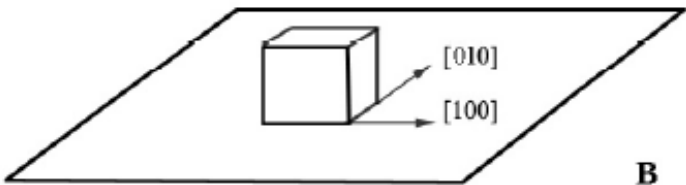
Такая обработка приводит к ориентации вдоль проката осей наиболее легкого намагничивания железа <001> (ребро куба), следовательно, формируется так называемая **ребровая текстура** со степенью текстурованности 90 %.



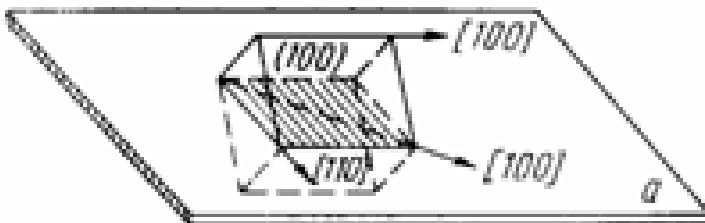
а



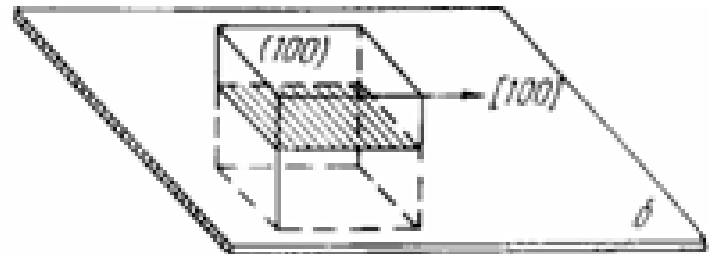
б



в



а



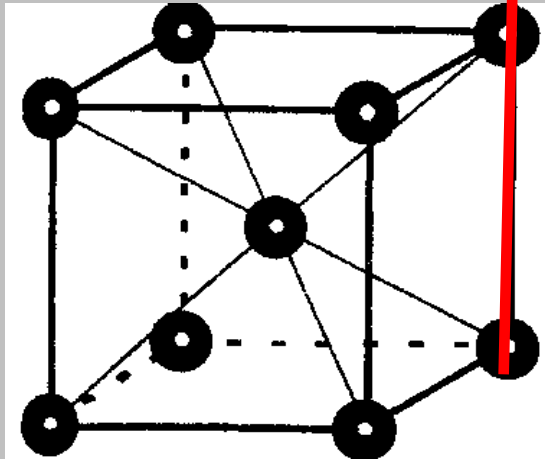
б

Схематическое изображение ребровой (а) плоскостной кубической (б), кубической (в) видов кристаллической текстуры в электротехнической стали.

СБОРКУ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ВЫПОЛНЯЮТ ТАК, ЧТОБЫ НАПРАВЛЕНИЯ $\langle 001 \rangle$ В ЛИСТЕ СТАЛИ И МАГНИТНОГО ПОТОКА В СЕРДЕЧНИКЕ СОВПАДАЛИ

Лист стали

$[001]$



В, Тл

Направление магнитного
потока в трансформаторе



ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

Благодаря наличию крупного зерна и текстуры в определенном направлении увеличивается магнитная проницаемость и уменьшается коэрцитивная сила и площадь петли гистерезиса.

Сборку трансформаторных сердечников выполняют так, чтобы направления $\langle 001 \rangle$ в листе стали и магнитного потока в сердечнике совпадали,



Сердечник трансформатора

в результате чего снижаются потери на гистерезис и получается высокая индукция в сравнительно малых магнитных полях.

У низкониелевого пермаллоя марки 50НП, который широко используют в приборах автоматической регуляции и вычислительной техники, высокое значение магнитной проницаемости в сочетании с большой остаточной индукцией B_r , которая очень близка к индукции насыщения B_s , получают за счёт прямоугольной петли гистерезиса путём создания кристаллографической текстуры посредством холодной прокатки с обжатием 98...99% и последующего отжига.

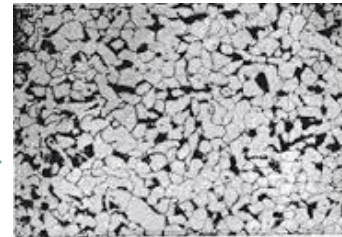
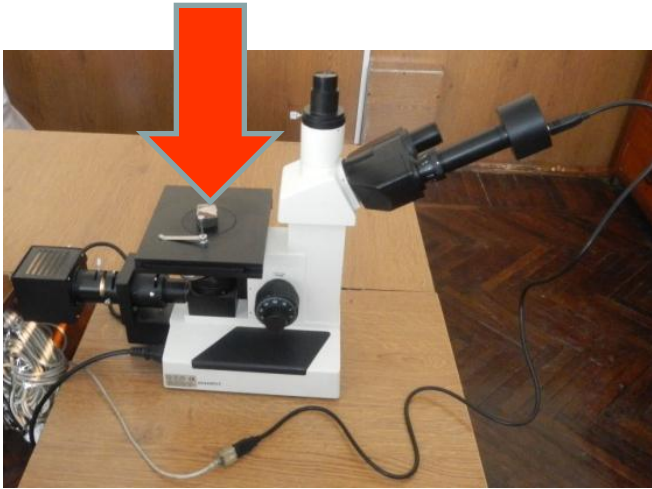
ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОБРАБОТКИ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Магнитные свойства легированной электротехнической тонколистовой стали

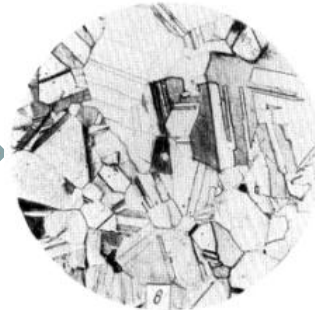
Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более	Магнитная индукция В, Тл, при напряжённости поля Н не менее 2500 А/м
1412 горячекатаная изотропная	0,5	4,4	1,46
2412 холоднокатаная изотропная	0,5	3,6	1,49
3412 холоднокатаная анизотропная	0,5	2,45	1,75

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить микроструктуру меди М1 и стали 10 до деформации в отожжённом состоянии.

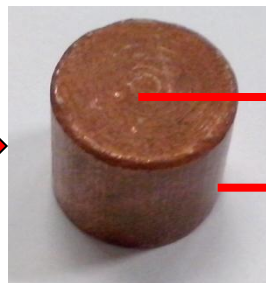
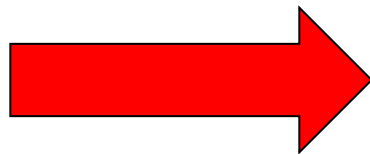


Сталь 10



Медь

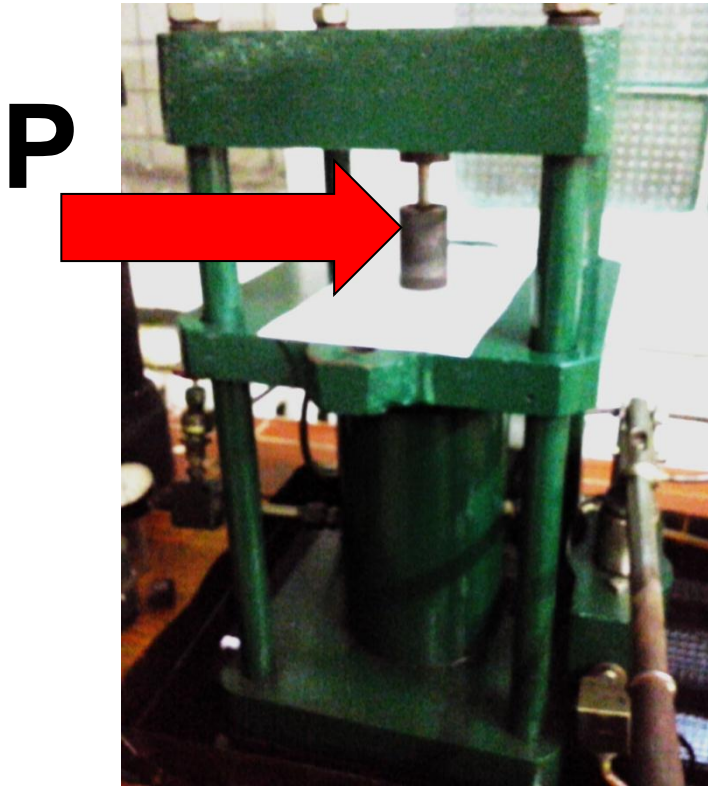
2. Измерить твердость и определить высоту медных и стальных образцов до деформации.



h_0

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3. Подвергнуть деформации образцы меди и стали при усилиях 50, 75 и 100 кН. Каждая группа студентов деформирует образцы при одном усилии.



4. Измерить твердость и определить высоту образцов после деформации с определенным усилием.

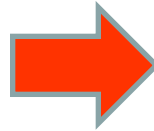
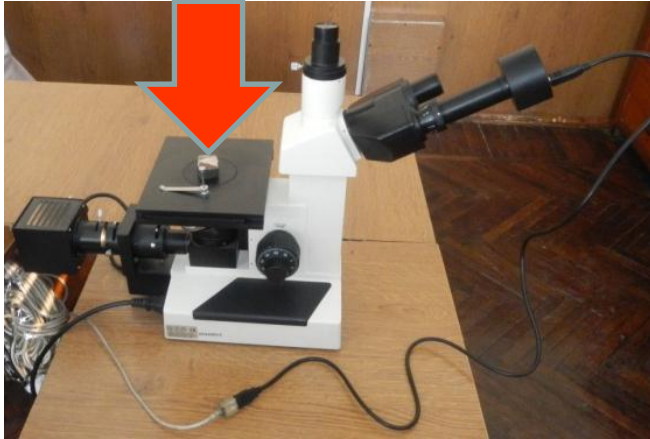
5. Определить степень пластической деформации образцов ε по относительному изменению их высоты:

$$\varepsilon = \frac{(h_0 - h)}{h_0} 100\%$$

где h_0 – высота образца до деформации;
 h - высота образца после деформации.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

6. Изучить микроструктуру образцов меди и стали 10 после деформации с разными степенями, обратить внимание на образование текстуры деформации.



Структура
стали после
деформации

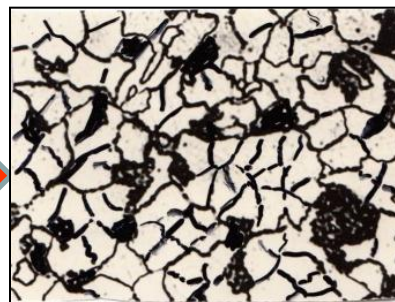
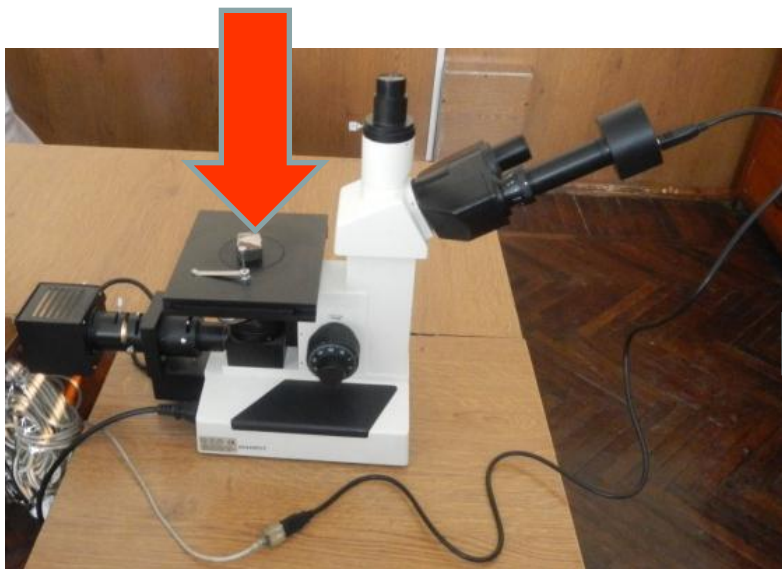
7. Медные и стальные образцы, деформированные при максимальном усилии (100 кН), загрузить в печи с температурами 200, 500 и 700 °С, выдержать при этих температурах на протяжении одного и того же времени (время выдержки в печи выбирают в зависимости от сечения образца), охладить в воздухе.



ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

8. Измерить твердость образцов после термической обработки.

9. Изучить микроструктуру деформированной меди и стали после нагрева до 200, 500 и 700°C, обратить внимание на развитие рекристаллизационных процессов.



Структура стали
после нагрева
(отжига)

10. Используя графики, определить удельное электросопротивление меди после деформации с разными степенями, а также после деформации на 75 % и последующего нагрева до 200, 500 и 700 °C.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

11. Определить теоретическую температуру рекристаллизации меди М1 и стали 10 по формуле: $T_p = a \cdot T_{пл} \text{ (K)}$,

12. Сравнить теоретическую температуру рекристаллизации с температурой, определенной в результате изучения микроструктуры и свойств образцов, которые исследовались.

13. Пользуясь справочными данными, определить основные магнитные свойства (удельные потери и магнитную индукцию) горячекатаной изотропной, холоднокатаной изотропной, холоднокатаной анизотропной с ребровой текстурой тонколистовой электротехнической легированной (2,8...3,8 % Si) стали при одинаковой толщине листа (для одной группы студентов это 0,5 мм, для второй - 0,35 мм) и напряженности магнитного поля не более 2500 А/м.

14. Оформить отчет о лабораторной работе.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТА

Отчет должен включать в себя:

1. Цель работы.
2. Сжатое изложение теоретических основ работы.
3. Результаты измерения твердости медных и стальных образцов до деформации, после деформации с разными степенями, после последующего нагрева до определённых температур, которые нужно записать в таблицу 1.
4. График изменения твердости меди и стали в зависимости от степени холодной пластической деформации $HRB = f(\varepsilon)$.
5. График изменения твердости деформированной меди и стали в зависимости от температуры нагрева $HRB=f(t)$ и определение температуры рекристаллизации.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТА

6. Схематическое изображение структуры меди и стали до деформации, после деформации, после рекристаллизации
7. Объяснение причин изменения удельного электросопротивления меди марки М1 в зависимости от степени деформации и последующего нагрева.
8. Показатели удельных потерь и магнитной индукции электротехнической легированной (2,8...3,8 % Si) стали марок 1412, 2412, 3412, которые нужно занести в таблицу 2. Объяснение причин разницы отмеченных свойств, учитывая технологию изготовления электротехнической кремнистой стали.
9. Расшифровка цифровой маркировки стали.

Таблица 1

Твёрдость меди М1 и стали 10 до деформации, после деформации и последующего нагрева до разных температур

Усилие деформации Р, кН	Степень деформации ε , %	Твёрдость HRB				
		До деформации	После деформации	После деформации и нагрева до °С		
				200	500	700
Медь						
50						
75						
100						
Сталь						
50						
75						
100						

Магнитные свойства легированной электротехнической тонколистовой стали

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более	Магнитная индукция В, Тл, при напряжённости поля Н не менее 2500 А/м
1412 горячекатаная изотропная			
2412 холоднокатаная изотропная			
3412 холоднокатаная анизотропная			

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Что такое деформация?**
- 2.Какие существуют виды деформации?**
- 3. Какой механизм пластической деформации в реальных металлах?**
- 4. К каким изменениям в структуре металлов приводит пластическая деформация?**
- 5. Что представляет собой текстура деформации и от каких факторов она зависит?**
- 6. Что такое наклёп, чем он обусловлен?**
- 7. Как изменяются механические характеристики, электропроводность и магнитные свойства металла при увеличении степени холодной пластической деформации?**
- 8. Что такое анизотропия и какое ее практическое значение?**

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

9. Каким образом можно снять наклёп?
10. Какие изменения в микроструктуре металла происходят на стадии возврата и как они влияют на свойства?
11. Как изменяется микроструктура и свойства металла в результате первичной рекристаллизации?
12. Что такое температура рекристаллизации и как ее определить?
13. Какая пластическая деформация является холодной, а какая - горячей?
14. Что представляет собой собирательная рекристаллизация?
15. Как осуществить рекристаллизационный отжиг и какова его цель?
16. Как размер зерна влияет на электропроводность и магнитные свойства металла?
17. Что такое текстура рекристаллизации, при каких условиях она имеет место? Каково её практическое значение?

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Изучить способы горячей и холодной пластической деформации, которые используют для получения электротехнических материалов.

2. Изучить сущность и практическое применение анизотропии свойств в электротехнике.

3. Ознакомиться с дислокационным механизмом пластической деформации.

4. Изучить процесс формирования ребровой текстуры.



ПРОТОКОЛ

к лабораторной работе №4 «Влияние холодной пластической деформации и последующего нагрева на структуру и свойства металлов и сплавов».



Сталь 10
отожжённая



Сталь 10
наклепанная



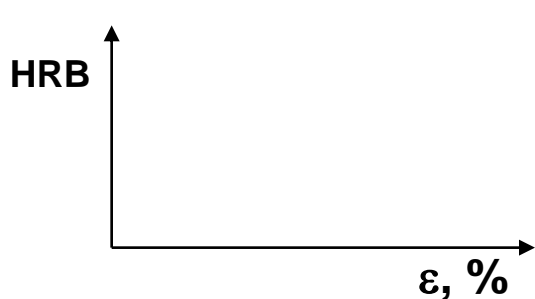
Сталь 10
после первичной рекристаллизации



Сталь 10
после собира-
тельной рекристал-
лизации

Усилие деформации P, кН	Степень деформации ϵ , %	Твёрдость HRB				
		До деформации	После деформации	После деформации и нагрева до t-ры, °C		
				200	500	700
Медь: 50 75 100						
Сталь: 50 75 100						

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более	Магнитная индукция B, Тл, при напряжённости поля H не менее 2500 А/м
1412 горячекатаная изотропная			
2412 холоднокатаная изотропная			
3412 холоднокатаная анизотропная			



Выводы:

Выполнил: ст. гр. _____

Принял: _____



Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталиа Алексеевна

E-mail: lalaz1991@mail.ru

г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М

Tel.(8-057)707-37-92