**Энгельсский технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.»**

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ, ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по курсу «Материаловедение»
для студентов направлений

15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»

очной и заочной формы обучения

Энгельс 2026

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к учебно-исследовательским лабораторным работам (УИЛР) «Кристаллизация, пластическая деформация и рекристаллизация металлов и сплавов» предназначены для изучения части курса «Материаловедение». Они составлены таким образом, чтобы при выполнении лабораторных работ у студентов, кроме усвоения лекционного материала, дополнительно прививались навыки к самостоятельной научно-исследовательской работе.

Написанный в соответствии с указаниями отчет по лабораторной работе соответствует обычно принятой методике составления отчета по научно-исследовательской работе. Для этого отчет по каждой УИЛР должен содержать разделы, включающие краткую теоретическую часть, методику эксперимента, результаты эксперимента и их обсуждение и выводы.

Методические указания содержат рекомендации о том, что должен содержать каждый раздел, его объем и порядок выполнения УИЛР. Для облегчения составления отчетов по первым работам приведены примеры написания каждого раздела. По этим работам студенты получают фактический материал из собственного эксперимента и вносят при необходимости свои коррективы применительно к конкретным условиям проведенного эксперимента.

Постепенно УИЛР усложняются. Примеры составления разделов не приводятся. Вместо этого ставятся наводящие вопросы. Отвечая на эти вопросы, студент составляет отчет по работе. В последующих работах наводящие вопросы также исключаются, чтобы студенты, пользуясь ранее полученными навыками, самостоятельно решали поставленные задачи исследования.

Достоинство метода усложнения лабораторных работ состоит в том, что преподаватель может всегда получить ответ на вопрос, как был усвоен ранее полученный материал и какие навыки самостоятельной научно-исследовательской работы получал каждый студент.

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТЕПЕНЬ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ И РАЗМЕР ЗЕРНА ПРИ ПЕРВИЧНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ

В первом разделе отчета по УИЛР «Введение» должна быть сделана общая оценка исследуемого вопроса и его значение с точки зрения народнохозяйственных задач, решаемых в курсе «Материаловедение». Здесь также должна быть поставлена задача исследования. Содержание этого раздела описано в нижеприведенном примере.

ПРИМЕР

1.1. Введение

Первичная кристаллизация формирует структуру металлов и сплавов, в частности, определяет размер зерна и имеет большое значение в технике. Рациональное управление этим процессом позволяет значительно повышать механические и физические свойства металлов и сплавов, что приводит к уменьшению габаритов, массы и снижению себестоимости машин и аппаратов. Для рационального управления процессом первичной кристаллизации необходимо изучить ее законы.

Задачей данной работы является установление влияния скорости охлаждения во время первичной кристаллизации на размер зерна в слитке.

Во втором разделе отчета по УИЛР «Теоретическая часть» должно содержаться описание состояния изучаемого вопроса по литературе. При этом делаются ссылки на литературные источники, номера ссылок отмечаются цифрами, заключенными в квадратные скобки.

В конце отчета приводятся библиографические описания литературных источников. В этом разделе могут быть приведены таблицы, графики, формулы и рисунки структур, если эти данные позволят сократить текстовую часть или смогут облегчить усвоение изучаемого вопроса. Объем, структура и содержание этого раздела показаны в примере.

ПРИМЕР

1.2. Теоретическая часть

Известно [1], что кристаллизация протекает в условиях, когда система переходит в термодинамически более устойчивое состояние с

меньшим запасом свободной энергии F. Если превращение происходит с небольшим изменением объема, то

$$F = H - TS,$$

где H - полная энергия системы; T - абсолютная температура; S - энтропия.

Изменение свободной энергии жидкого и твердого состояний в зависимости от температуры показано графически на рис. 1. Выше температуры $T_{пл}$ более устойчиво жидкое состояние металла, имеющего меньший запас свободной энергии $F_ж$, а ниже этой температуры - устойчиво твердое состояние металла. При температуре $T_{пл}$ величины свободных энергий жидкого и твердого состояний равны.

Температура $T_{пл}$ называется равновесной температурой плавления или кристаллизации. При этой температуре жидкая и твердая фазы могут сосуществовать бесконечно долго. Процесс кристаллизации при этой температуре еще не начинается. Он может начаться тогда, когда между жидким и твердым состоянием возникает разность свободных энергий ΔF. Следовательно, процесс кристаллизации может протекать только при переохлаждении металла ниже равновесной температуры $T_{пл}$.

Разность между температурами плавления и кристаллизации $\Delta T = T_{пл} - T_к$ называется степенью переохлаждения. Степень переохлаждения зависит от скорости охлаждения. При увеличении скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает.

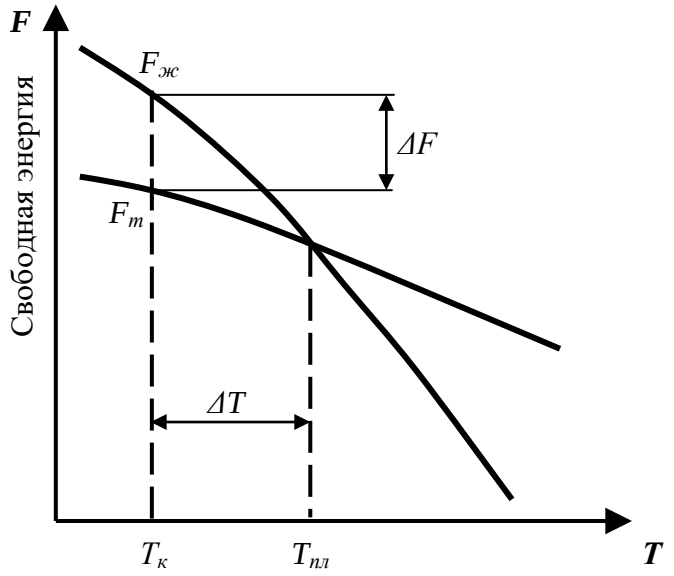


Рис. 1. Изменение свободной энергии металла в жидком ($F_ж$) и твердом (F_m) состояниях в зависимости от температуры

Степень переохлаждения влияет на размер зерна при кристаллизации металлов и сплавов. Размер зерна определяется в зависимости от числа

зародышей кристаллизации и скорости их роста. При небольшой степени переохлаждения число зародышей мало, в этих условиях в слитке получается более крупнее зерно. С увеличением степени переохлаждения скорость образования зародышей возрастает и размер зерна в затвердевшем металле уменьшается.

В третьем разделе отчета по УИЛР «Методика эксперимента» должно содержаться описание объекта исследования, последовательности решения поставленной задачи; приводится краткое описание технологического оборудования, методов и средств измерений. Должна быть дана оценка погрешности измерений и описан метод обработки результатов эксперимента. В этом разделе должны быть указаны требования безопасности труда. Содержание этого раздела показано в нижеследующем примере.

ПРИМЕР

1.3. Методика эксперимента

В качестве объекта исследования была выбрана сурьма. Это связано с тем, что при ее кристаллизации наблюдается достаточно высокая степень переохлаждения, достигающая 135 °С.

Кусочки сурьмы помещались в три алундовых тигля и нагревались до температура 700°С в муфельной электропечи МП-2У. Выдержка составляла 20 мин. Затем электропечь выключали и два тигля извлекали из печи. Один из них охлаждали на воздухе, а другой - на массивной медной подложке. Оставшийся тигель охлаждали вместе с печью. При этом измеряли температуру, записывали кривые охлаждения. Запись производили на диаграмме трехточечного автоматического потенциометра КСП-4.

Температуру измеряли погружением термопары гр. ХА в расплав металла. Точность измерения температуры составляла не ниже 0,5%, и максимальная погрешность при температуре 700°С не превышала ± 3,5°С. По кривым охлаждения определяли скорость охлаждения в момент кристаллизации и температуру кристаллизации $T_к$. Определяли степень переохлаждения ΔT как разность между $T_к$ и равновесной температурой $T_{пл}$ равной для сурьмы 630°С. Полученные данные заносили в таблицу.

Из слитков изготавливали образцы-микрошлифы и исследовали их структуру под металлографическим микроскопом МИМ-6 или МИМ-7 при увеличениях х100. При этом для каждого образца подсчитывали количество зерен n, находящихся в поле зрения. Затем из отношения 1/n определяли относительный объем зерна.

ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

При выполнении работы необходимо проявить внимание и осторожность при извлечении и переносе тигля с расплавом металла. Перед извлечением тигля необходимо отключить электропечь. Не допускается делать резких движений и наклонять тигель при его переносе.

После изучения первых трех разделов необходимо приступить к выполнению экспериментальной части работы.

В четвертом разделе отчета по УИЛР «Результаты эксперимента и их обсуждение» должны содержаться результаты эксперимента, оформленные в виде таблиц, графиков и рисунков микроструктур, которые сопровождаются текстовым обсуждением. Содержание этого раздела показано в нижеследующем примере.

ПРИМЕР

1.4. Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты эксперимента представлены на рис. 2 в виде кривых охлаждения и в табл. 1.

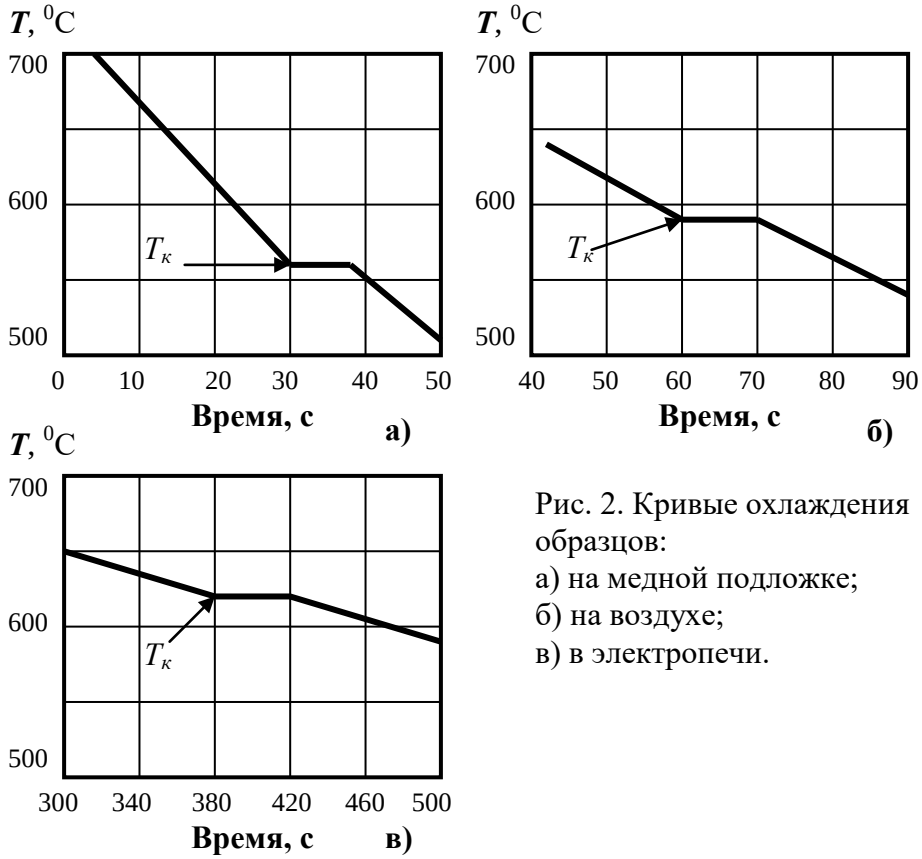


Рис. 2. Кривые охлаждения образцов:
а) на медной подложке;
б) на воздухе;
в) в электропечи.

Таблица 1

№ обр.	Скорость охлаждения, ^{0}С/с	Температура кристаллизации, ^{0}С	Степень переохлаждения, ^{0}С	Относительный объем зерна
1	4	560	70 ± 3,5	0,040
2	2,5	585	45 ± 3,5	0,052
3	0,5	620	10 ± 3,5	0,089

Из графиков, показанных на рис. 2, следует, что на кривых охлаждения имеется горизонтальный участок. Это свидетельствует о том, что первичная кристаллизация сурьмы происходит при постоянной температуре. Различный угол наклона кривых охлаждения вблизи горизонтального участка свидетельствует о разной скорости охлаждения образцов.

Из данных, приведенных в таблице, следует, что с минимальной скоростью охлаждались образцы в электропечи. При уменьшении скорости охлаждения температура кристаллизации повышается и соответственно уменьшается степень переохлаждения расплава от (70 ± 3,5) °С до (10 ± 3,5) °С. При этом возрастает относительный объем зерна.

В пятом разделе отчета по УИЛР «Выводы» должно быть сделано краткое обобщение сущности выполненной работы и содержаться ответ на те вопросы, которые были сформулированы в задаче исследования. Содержание этого раздела показано в следующем примере.

ПРИМЕР

ВЫВОДЫ

Установлено на примере сурьмы, что увеличение скорости охлаждения во время первичной кристаллизации металла приводит к увеличению степени переохлаждения и к измельчению зерна в слитке.

Отчет по УИЛР должен заканчиваться списком используемой литературы. Приводимые в списке сведения о книгах должны включать фамилию, инициалы автора, название книги, место издания, издательство, год издания и объем в страницах. Для данной работы он показан в нижеследующем примере.

ПРИМЕР

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин Ю.М. Металловедение, и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1977. – 408 с.

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В методических указаниях к предыдущей УИЛР было показано, какие разделы включает отчет по УИЛР и что должен содержать каждый раздел. Были приведены примеры составления каждого раздела отчета. В указаниях к данной работе будет также дан пример составления первых трех разделов, но по четвертому разделу отчета будет показана лишь форма представления результатов эксперимента с перечислением наводящих вопросов, необходимых для анализа результатов эксперимента. Выводы по работе также необходимо будет сформулировать, отвечая на поставленный вопрос.

ПРИМЕР

2.1. Введение

Пластическая деформация приводит к изменению структуры и физико-механических свойств металлов и сплавов. Этим пользуются на практике для создания текстуры деформации и наведения анизотропии физико-механических свойств металлов и сплавов. Необходимо установить законы пластической деформации для управления процессом получения холоднокатанного сортового проката. Этот nроцесс имеет большое народнохозяйственное значение.

Как известно из общего курса «Металловедение», должна существовать определенная связь между степенью холодной пластической деформации, структурой и свойствами металлов и сплавов. Поэтому задачей настоящей работы является установление этой связи и, в частности, влияния степени холодной пластической деформации на структуру и свойства металлов и сплавов.

2.2. Теоретическая часть

Известно [1], что механизм пластической деформации связан с размножением и перемещением дислокации в кристаллической решетке. Дислокации могут зарождаться еще во время кристаллизации металлов и сплавов. Под влиянием напряжений они могут размножаться, например, по механизму источника Франка-Рида.

Дислокации перемещаются в кристаллах двумя способами –

скольжением и переползанием. При скольжении дислокация перемещается в направлении, соответствующем ее вектору Бюргерса, а при переползании – под углом к нему.

Процесс переползания дислокаций — это диффузионное смещение дислокационной линии вследствие присоединения к ней вакансий или межузельных атомов.

Основным процессом холодной пластической деформации является скольжение. При этом плоскости и направления скольжения не могут быть произвольными и образуют определенные системы скольжения. Число возможных систем скольжения различно в системах с разными типами кристаллических решеток. Например, у никеля с ГЦК-решеткой оно равно 12, а у железа с ОЦК-решеткой оно равно 48.

Пластическая деформация металлов и сплавов с поликристаллической структурой начинается сразу по нескольким системам скольжения и сопровождается изгибами и поворотами плоскостей скольжения. При этом параллельные плоскости скольжения объединяются в пачки плоскостей, которые выявляются на оптическом металлографическом микроскопе в виде линий, пересекающих по шлифу каждое отдельно взятое зерно.

С ростом деформации изменяется форма зерен. Зерна постепенно вытягиваются (рис. 3) и плотность дефектов (дислокаций) возрастает до некоторого предельного уровня (10^{13}см$^{-2}$). Границы зерен затушевываются деформированной структурой в оболочке зерен. При деформациях более 40% образуется волокнистая структура. Увеличение количества дефектов приводит к тому, что перемещение дислокаций затрудняется. Это приводит к упрочнению металлов и сплавов.

Уровень запасенной наклепанным металлом (сплавом) энергии на 5 – 10% выше, чем до деформации. Эта прибавка энергии затрачивается на образование добавочной плотности дефектов и возникновение упругих искажений решетки. Свойства меняются тем сильнее, чем больше степень деформации. После деформирования увеличиваются прочностные характеристики и понижаются вязкость и пластичность.

2.3. Методика эксперимента

Методика эксперимента включала деформацию с различной степенью образцов из малоуглеродистой стали 10 на гидравлическом прессе. Степень деформации определялась из соотношения

$$f = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \cdot 100\%,$$

где h_1 – высота образцов до деформации, мм; h_2 – высота образцов после деформации, мм. Высота образцов измерялась штангенциркулем ШЦО-160

(ГОСТ 166–73) с точностью до 0,05 мм. Степень деформации изменялась в пределах от 0 до 50% с интервалом через 10%. После деформации измерялась твердость образцов на твердомере ТК-2М.

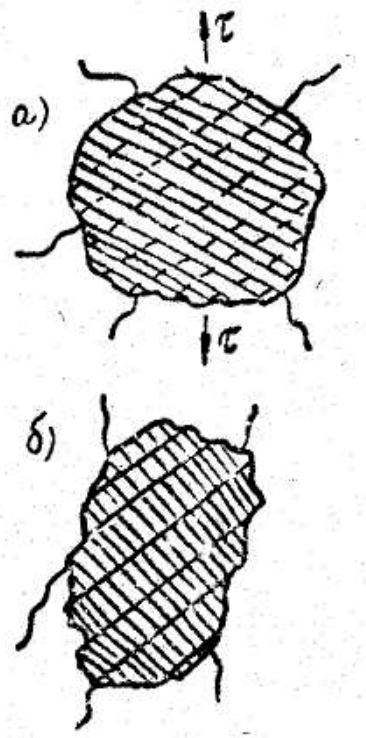


Рис. 3. Схема деформации отдельного зерна:
а) до деформации;
б) после деформации.

Среднеарифметическое значение твердости образца определялось из трех измерений. Погрешность при измерении твердости не превышала ± 2ед. Микроструктура исходного и деформированных образцов при увеличениях х100 изучалась под металлографическими микроскопами МИМ-6 и МИМ-7.

ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

Особые требования безопасности труда не предъявляются. После изучения первых трех разделов необходимо приступить к выполнению экспериментальной части работы.

2.4. Результаты эксперимента и их обсуждение

В табл. 2 приведены примерные формы представления результатов исследования.

Таблица 2

№ образца	1	2	3	4	5	6
Степень деформации, %	0	10	20	30	40	50
Твердость, HRB						

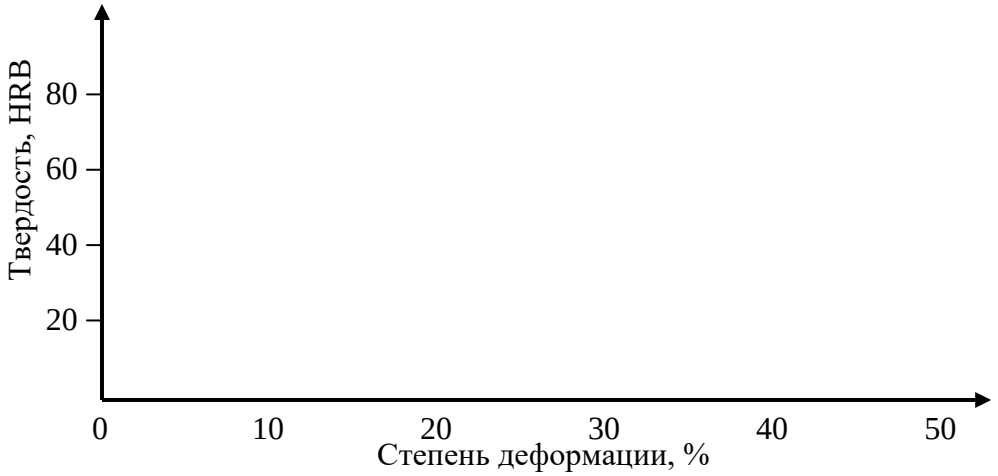


Рис. 4. График зависимости твердости (HRB) образцов стали 10 от степени холодной пластической деформации (%).

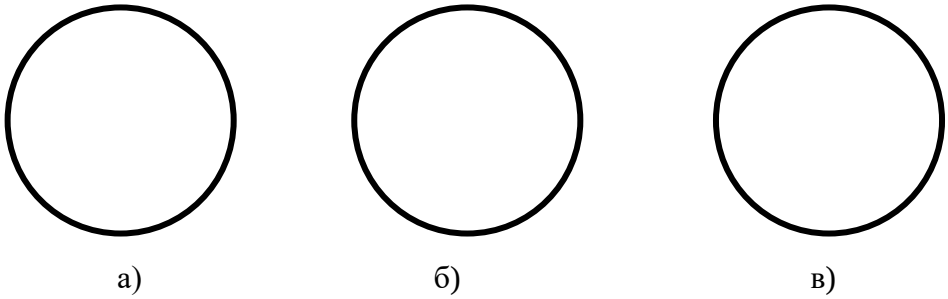


Рис. 5. Схематические рисунки микроструктур образцов стали 10 после холодной пластической деформации с различной степенью:
а) 0%; б) 10%; в) 50%.

Из представленных данных в таблице и на рис. 4 и 5 видно, что ... . Далее, письменно отвечая на нижеследующие вопросы, необходимо проанализировать полученные результаты. Ответы должны быть такими, чтобы получилось последовательное логическое обсуждение результатов

эксперимента. Что происходит с твердостью образцов стали после холодной пластической деформации? Как зависит твердость от степени холодной пластической деформации? Сопровождается ли увеличение твердости изменениями микроструктуры стали? Как изменяется микроструктура? Наблюдаются ли на шлифе плоскости скольжения? Изменяется ли форма зерен? Чем можно объяснить повышение твердости образцов при увеличении степени холодной пластической деформации?

ВЫВОД

Установлено, что ... .

Далее, письменно отвечая на нижеследующий вопрос, нужно сформулировать вывод по данной работе.

Как изменяются твердость и микроструктура образцов стали 10 при увеличении степени холодной пластической деформации?

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин Ю.М. - Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин – М.: Металлургия, 1977. – 408с.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В отчете по данной УИЛР разделы 3.1 «Введение» и 3.2 «Теоретическая часть» необходимо составить самим студентом письменно, отвечая на нижеследующие вопросы. Для составления ответов можно пользоваться рекомендованной литературой. При этом необходимо сделать ссылки на используемую литературу.

3.1. Введение

Какие процессы протекают при нагреве холоднодеформированных металлов и сплавов? Как при этом изменяется количество дефектов кристаллического строения? Как изменяются свойства холоднодеформи–рованных металлов и сплавов? Какое значение имеют предрекристаллиза–ционные и рекристаллизационные процессы в металлах и сплавах с точки зрения поставленных перед страной народнохозяйственных задач? Что является задачей данной работы?

3.2. Теоретическая часть

Как изменяется количество дефектов в процессе возврата? Как изменяются свойства в процессе возврата? Как изменяется количество дефектов после рекристаллизации обработки? Как изменяется структура металла и сплава после рекристаллизации обработки? Как изменяются свойства после рекристаллизации обработки? Как изменяется структура после собирательной рекристаллизации обработки?

3.3. Методика эксперимента

Методика эксперимента включала отжиг при различной температуре образцов из стали 10, подвергнутых холодной пластической деформации со степенью 40–50%. Нагрев проводился в муфельной электропечи МП-27. Контроль и регулирование температуры осуществлялись электронным автоматическим потенциометром КСП-3. Погрешность при измерении температуры не превышала ± 10 °С. После нагрева до температур 300, 400, 530, 550, 600, 700 и 800°С проводили изометрическую выдержку в течение 10 минут. Затем образцы охлаждали на воздухе. На заточном станке зачищали торцы образцов от окалины и измеряли их твердость HRB по ГОСТ 9013-60 на твердомере ТК-2М. Среднеарифметическое значение твердости определяли из трех измерений. Погрешность при измерении твердости не превышала ± 2 ед.

Микроструктуру образцов в исходном и отожженной состояниях изучали на металломикроскопах МИМ-6 и МИМ-7 при увеличениях х240.

ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

При выполнении работы необходимо проявлять внимание и осторожность при извлечении образцов из электропечи. Перед извлечением обрацов необходимо отключить электропечь.

После подготовки разделов «Введение» и «Теоретическая часть» и изучения методики эксперимента необходимо приступить к выполнению экспериментальной части работы.

3.4. Результаты эксперимента и их обсуждение

В табл. 3 приведены примерные формы представленных результатов исследования.

Таблица 3

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура, °С	300	400	450	500	550	600	700	800
Твердость, HRB								

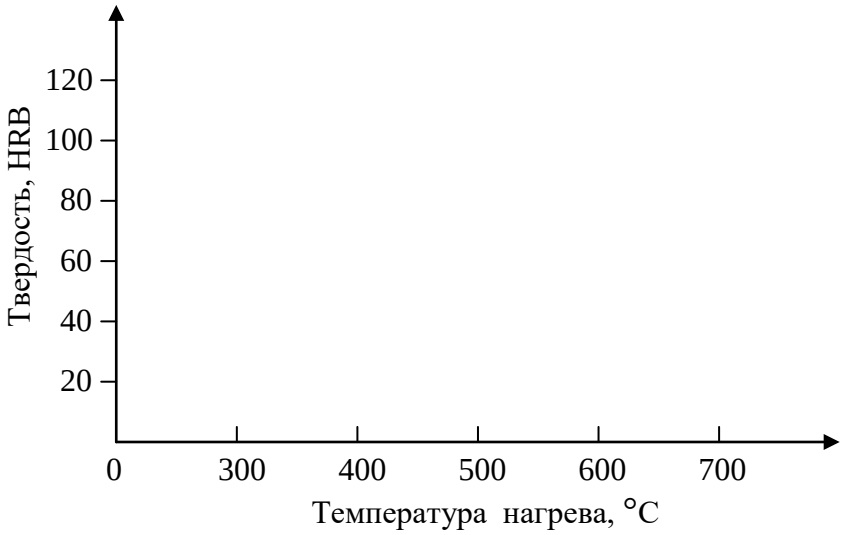
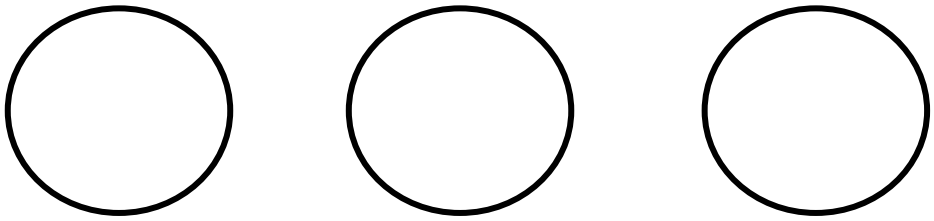


Рис.6. График зависимости твердости (HRB) образцов стали 10 от температуры отжига.



а) б) с)

Рис.7. Схематические рисунки микроструктур образцов стали 10 после отжига при различной температуре:
а) 300°С; б) 550°С; в) 800°С.

Из представленных данных в таблице и на рис. 6 и 7 видно, что ... . Далее, письменно отвечая на нижеследующие вопросы, необходимо проанализировать полученные результаты. Ответы формулировать таким образом, чтобы получилось последовательное логическое обсуждение результатов эксперимента.

Что происходит с твердостью образцов после отжига? Как зависит твердость от температуры отжига? Сопровождается ли уменьшение твердости изменениями микроструктуры стали? Как изменяется микроструктура? Наблюдается ли рост зерна при увеличении температуры отжига? Чем можно объяснить понижение твердости образцов после отжига? В каком температурном интервале происходит процесс ре-

кристаллизации обработки? В каком температурном интервале происходит процесс возврата? Наблюдается ли при этом изменение макроструктуры и уменьшение твердости? Какими изменениями в микроструктуре сопровождается этот процесс? Происходит ля уменьшение твердости после завершения процесса собирательной рекристаллизации?

ВЫВОД

Установлено, что ... .

Далее, письменно отвечая на нижеследующий вопрос, нужно сформулировать вывод по данной работе.

Как изменяется твердость и микроструктура образцов стали 10 при увеличении температуры отжига?

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ, ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по курсу «Материаловедение»
для студентов механических специальностей

Составили: Сопляченко Вячеслав Николаевич,
Земченков Владимир Степанович

Рецензент А.М. Долгих
Корректор Е.В. Григоренко

Подписано в печать Формат 60x84 1/16
Бум. тип. Усл.-печ.л. 0,93 (1,0) Уч.-изд.л 1,0
Тираж 100экз. Заказ Бесплатно

Саратовский государственный технический университет
410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Копипринтер СГТУ, 410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77