

А.С. Макаров, Е.О. Манакова, Р.А. Кончаков,  
Г.В. Афонин, В.А. Хоник

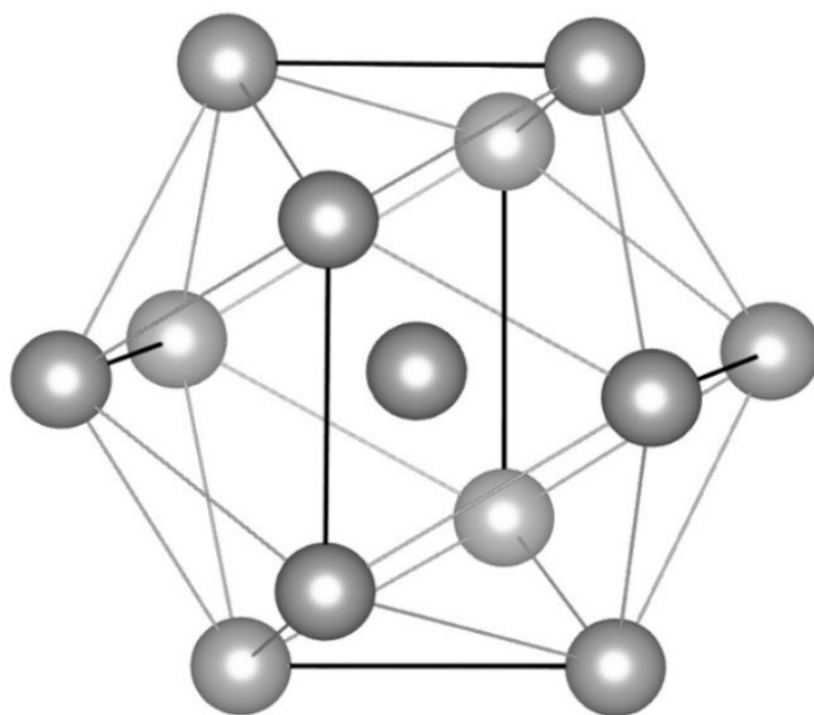
---

---

# СТЕКЛООБРАЗУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСПЛАВОВ

---

---



ВОРОНЕЖ  
2021

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

**А.С. Макаров, Е.О. Манакова, Р.А. Кончаков,  
Г.В. Афонин, В.А. Хоник**

## **СТЕКЛООБРАЗУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСПЛАВОВ**

*Учебно-методическое пособие  
по дисциплине «Физика некристаллических тел» для студентов  
бакалавриата физико-математического факультета, обучающихся  
по направлению подготовки 44.03.05 Педагогическое образование  
(с двумя профилями подготовки), профили: «Естествознание», «Физика»*

ВОРОНЕЖ  
Воронежский государственный педагогический университет  
2021

УДК 538.91  
ББК Р22  
С791

Издано по решению  
учебно-методического совета ВГПУ.  
Протокол № 7 от 15 апреля 2021 г.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой общей физики  
*А.Ф. Клинских* (ВГУ);  
кандидат педагогических наук, доцент,  
декан физико-математического факультета,  
*В.В. Малев* (ВГПУ)

Ответственный редактор:

доктор физико-математических наук, профессор  
*В.В. Свиридов*

**Стеклообразующая способность расплавов** : учебно-методическое пособие по дисциплине «Физика некристаллических тел» для студентов бакалавриата физико-математического факультета, обучающихся по направлению подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки), профили: «Естествознание», «Физика» / А.С. Макаров [и др.]. – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2021. – 40 с.

Учебно-методическое пособие содержит расчетные задания, которые могут студентам познакомиться с активно развивающимся направлением физики некристаллических материалов – поиском сплавов с высокой стеклообразующей способностью. В пособии представлены теоретические сведения, графические задачи, примеры выполнения заданий и контрольные вопросы.

Рекомендуется студентам бакалавриата физико-математического факультета, обучающихся по направлению подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки), профили: «Естествознание», «Физика»

УДК 538.91  
ББК Р22

©Макаров А.С., 2021

©Манакова Е.О., 2021

©Кончаков Р.А., 2021

©Афонин Г.В., 2021

©Хоник В.А., 2021

© Воронежский государственный педагогический университет,  
редакционно-издательская обработка, 2021

## Введение

Данное учебно-методическое пособие содержит расчетные задания, которые помогут студентам познакомиться с активно развивающимся направлением физики некристаллических материалов – поиском сплавов с высокой стеклообразующей способностью.

Основной целью выполнения заданий является формирование у студентов компетенций, связанных с учебно-исследовательской деятельностью обучающихся (ПК-12) и со способностью выполнять научные исследования и разработки в области физического и естественнонаучного образования с использованием современных научных методов (СК-12).

Представленные расчетные задания помогут сформировать у студентов комплексное представление о взаимосвязи стеклообразующих параметров с критической скоростью охлаждения и критическим диаметром, а также с температурой стеклования, температурой ликвидуса, температурой начала кристаллизации и т.д. В результате выполнения предлагаемых заданий, обучающиеся смогут оценить стеклообразующую способность сплавов на основе различных характеристик и параметров.

Предлагаемые в учебном пособии количественные, качественные и графические задачи разбиты на три блока по 15 заданий. В каждом блоке дается пример выполнения заданий, контрольные вопросы и список литературы. Необходимые справочные данные в виде сводной таблицы значений стеклообразующих параметров ряда аморфных расплавов, а также некоторые дополнительные инструкции вынесены в приложение.

Все задания составлены с учетом того, чтобы студенты ясно представили существо изучаемых явлений и методов их исследования. Это позволит студентам приступить к выполнению заданий даже не имея специальной предварительной подготовки по данной теме, т.е. независимо от того изучен ли данный материал полностью или только приступили к его изучению.

После выполнения заданий рекомендуется проводить их защиту, в процессе которой студент должен:

- продемонстрировать знание методики выполнения заданий;
- уметь интерпретировать полученные в процессе выполнения заданий результаты;

– пояснять способ обработки результатов и обосновывать сделанные выводы;

– отвечать на контрольные вопросы.

Учебно-методическое пособие достаточно актуально, так как расчетные задания построены на основе исходных данных, взятых из современных научных статей ведущих периодических изданий. Особо стоит отметить, что содержание пособия при необходимости достаточно легко может быть преобразовано в полноценную учебно-исследовательскую работу.

Пособие является полезным источником информации как для более глубокого освоения физики некристаллических тел, так и для развития общей физической эрудиции студентов. Рекомендуется использовать данное учебное пособие при освоении дисциплины «Физика некристаллических тел» для студентов бакалавриата физико-математического факультета Воронежского государственного педагогического университета по направлению «Педагогическое образование» с двумя профилями «Естествознание», «Физика».

# Глава 1. Теоретические основы понятия «Стеклообразующая способность расплава»

## 1.1. Основные сведения о металлических стеклах

Впервые в 1960 году был получен металлический сплав в странном некристаллическом состоянии группой исследователей под руководством профессора Дювеза. Его странность была замечена на рентгенограммах, где отсутствовали линии, соответствующие каким бы то ни было кристаллическим фазам и наблюдалось только широкое гало. Данная работа считается первой, где упоминались аморфные металлические сплавы или металлические стекла.

Однако незадолго до этого Мирошниченко и Салли в Днепропетровске уже научились получать металлические сплавы в некристаллическом состоянии. Свою работу они опубликовали в не очень популярном журнале «Заводская лаборатория» и эта работа осталась незамеченной. Далее пошла лавина работ, аморфную фазу удавалось получить все в большем и большем количестве систем, и буквально через несколько лет количество аморфизирующихся систем исчислялось уже сотнями. Интерес к металлическим стеклам был обусловлен как их необычной структурой, совершенно нетипичной для сплавов, так и целым комплексом выдающихся физико-химических свойств. Среди аморфных сплавов есть высокопрочные, магнитожесткие и магнитомягкие, коррозионно-стойкие и другие материалы.

За последние два десятилетия были достигнуты успехи в синтезе мультикомпонентных объемных металлических стекол (со структурой), что привело к увеличению производственных размеров этих материалов с 1 мм до нескольких см, были предложены некоторые эмпирические подходы для открытия новых стекол с лучшей стеклообразующей способностью.

При быстром охлаждении металлического расплава можно зафиксировать структурное состояние жидкости в твердом состоянии. Такие затвердевшие жидкости имеют ряд особенностей, включая отсутствие кристаллической структуры. При разломе или сколе поверхность такого твердого тела имеет произвольную

форму, а различные свойства практически не зависят от направления их измерения, т.е. твердое тело является изотропным. Такие тела называют аморфными, или аморфными металлическими сплавами (АМС).

Аморфные металлы и сплавы (металлические стекла) представляют собой новый класс материалов, отличающихся от обычных металлов отсутствием упорядоченности в расположении атомов, свойственной кристаллическим твердым телам.

Классическим примером аморфного материала, известного сотни лет, является стекло. В прошлом веке аморфное состояние установлено в тонких напыленных пленках (40-е годы), получен аморфный сплав при быстрой закалке расплава Au–Si (60-е годы) и палладия (70-е годы), аморфные пленки SiO<sub>2</sub> (1968г.). Металлические закаленные расплавы характеризуются сочетанием высокой прочности, пластичности и коррозионной стойкости, имеют уникальные физические характеристики.

Объемные металлические стекла – это относительно новые материалы, обладающие стекловидной структурой и большой толщиной сечения. Эти материалы обладают захватывающим сочетанием свойств, таких как высокая механическая прочность, хорошая термическая стабильность, большая область переохлажденной жидкости и потенциал для легкого формования.

«При охлаждении ниже температуры кристаллизации жидкость становится переохлажденной. Это состояние является метастабильным: если зафиксировать температуру и подождать некоторое время, то жидкость кристаллизуется, то есть переходит в твердое состояние, в котором атомы образуют правильную кристаллическую решетку». При непрерывном охлаждении жидкость также может перейти в твердое кристаллическое состояние, однако, при определенных условиях она может перейти в совсем иное твердое состояние. Если скорость охлаждения выше некоторой критической, то происходит стеклование жидкости, при котором резко, скачком меняются некоторые ее физические характеристики и жидкость переходит в твердое состояние, которое называется стеклом.

Возможность получения стеклообразного состояния вещества определяется тем, насколько легко происходит его кристаллизация. По этому признаку вещества можно разделить на три группы.

К первой группе относятся «многие органические полимерные жидкости. Кристаллизация таких жидкостей затруднена из-за малой подвижности ее длинных полимерных молекул, находящихся в сложном переплетенном состоянии. Даже при очень медленном охлаждении такой жидкости она, не кристаллизуясь, доходит до температур, при которых происходит ее стеклование». Такие жидкости иногда называют естественно аморфными. Естественно аморфными являются многие природные смолы.

Вторую группу образуют вещества, которые хорошо поддаются как кристаллизации (при медленном темпе охлаждения), так и стеклованию. Классическим примером является глицерин. Для таких веществ можно производить измерение характеристик, как кристалла, так и переохлажденной жидкости при одинаковых температурах, что оказывается важным для понимания природы стеклования. Жидкости первой и второй групп называют стеклообразующими.

К третьей группе относятся легко кристаллизующиеся вещества, для которых существование стеклообразного состояния долго считалось невозможным. Классическим примером таких веществ можно считать чистые металлы и различные сплавы. «Однако в последнее время появились методы получения сверхбыстрого охлаждения до  $10^8$  К/с. При столь быстром охлаждении удалось получить аморфное состояние многих металлов и сплавов».

При охлаждении в течение достаточно продолжительного промежутка времени, так что становится возможным термодинамически равновесное состояние жидкости, расплав кристаллизуется при температуре затвердевания  $T_m$ . Однако при большой скорости охлаждения жидкость не кристаллизуется даже при переохлаждении ниже  $T_m$ . Жидкость в таком состоянии называется переохлажденной. «Далее, если скорость охлаждения поддерживается достаточно большой, то жидкость не превращается в кристалл, структура жидкости сохраняется до довольно низких температур, но, в конце концов, жидкость все же затвердевает. В этом случае возникает аморфное, состояние, которое является структурно метастабильным и термодинамически неравновесным. Переохлажденная жидкость затвердевает при температуре, называемой температурой стеклования  $T_g$ . Изменение состояния вещества сопровождается изменением физических свойств».



«Переход вещества из жидкого состояния в стеклообразную фазу, например, при быстром затвердевании, характеризуется особенностями, которых нет при обычной кристаллизации, так как возникает твердое тело с таким же расположением атомов, как в переохлажденном расплаве. Такое неравновесное твердое состояние называют состоянием стекла, а температуру, при которой происходит затвердевание, температурой стеклования  $T_g$ ». Существует несколько определений температуры стеклования: это температура, при которой происходит затвердевание жидкости и резко возрастает вязкость, или температура, ниже которой время релаксации возникшего состояния настолько велико, что равновесие не достижимо за конечное время. При  $T_g$  вязкость возрастает от  $10^{-2}$  Па·с (вблизи  $T_{пл}$ ) до  $10^{12}$  Па·с (в твердом теле вязкость –  $10^{16}$  Па·с). Вязкость  $\eta$ , как известно, определяет время структурной релаксации  $\tau$  по формуле

$$\tau = \frac{\eta}{\mu}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига.

«В жидком состоянии энергия активации вязкого перемещения атомов почти всегда составляет  $E \approx 3kT$  (при  $T = 1000$  К величина  $E \approx 1$  эВ). При кристаллизации жидкости вязкость возрастает очень сильно». Однако при температуре ниже  $T_{пл}$  в случае подавления кристаллизации, когда жидкость находится в переохлажденном состоянии, вязкость с уменьшением температуры возрастает непрерывно. В частности, изменение вязкости переохлажденной жидкости с температурой в интервале  $\eta = 10^4 - 10^{12}$  Па·с в хорошем приближении описывается выражением

$$\eta = \eta_0 \exp[V/(T - T_0)], \quad (2)$$

где  $\eta_0$  и  $V$  – постоянные,  $T_0$  – температура «идеального» стеклования, являющаяся характеристикой данного сплава. На рис. 1.1. показано изменение теплоемкости от температуры при нагревании и быстром охлаждении. «В результате фазового перехода расплав - твердое тело при быстром охлаждении (замораживании расплава) создается метастабильное состояние твердой фазы вследствие

того, что перестроение атомов в равновесное состояние (релаксация) не успевает завершиться. Свободная энергия атомов не успевает достичь минимума – равновесия. Как известно, равновесную структуру при затвердевании формируют два конкурирующих процесса: упорядочение (перестроение) атомов в кристалл и стремление системы к беспорядку».

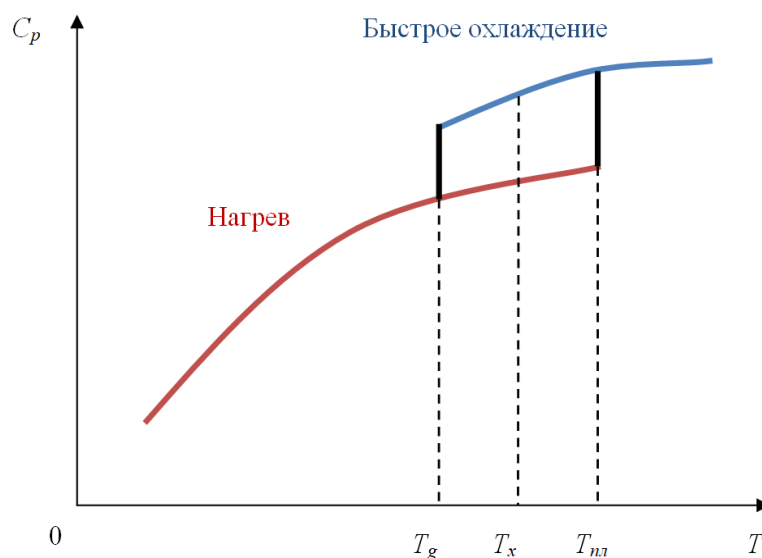


Рис. 1.1 Изменение теплоемкости сплава при нагревании и быстром охлаждении:  $T_g$  – температура стеклования;  $T_c$  – температура кристаллизации;  $T_{пл}$  – температура плавления.

## 1.2. Критическая скорость охлаждения расплава

С теоретической точки зрения любая жидкость при достаточно большой скорости охлаждения может избежать кристаллизации и перейти в стеклообразное, аморфное состояние. «Для каждого расплава существует критическая скорость охлаждения  $R_c$ , необходимая для стеклообразования. Например, для очень чистого расплава  $R_c$  можно рассчитать по теории образования и роста зародышей кристаллов. Ведь при заданной температуре имеется совершенно определенное количество кристаллов, для зарождения которых требуется некоторое время  $t$ ».

При охлаждении переохлажденной жидкости в ней могут протекать процессы образования и роста зародышей кристаллизации. Стоит подчеркнуть, что с понижением температуры частота появ-

ления зародышей кристаллизации уменьшается, а скорость их роста возрастает. Можно построить так называемую С-образную диаграмму начала кристаллизации. Эта диаграмма называется ТТТ-диаграмма (temperature-time-transformation).

Она схематично приведена на рис. 1.2. «Штриховые линии на рисунке представляют собой аналогичную диаграмму при непрерывном охлаждении (так называемая ССТ-диаграмма). ТТТ-диаграммы получают в изотермических условиях, а ССТ-диаграммы – в условиях непрерывного охлаждения, поэтому между ними имеются некоторые различия. Однако они небольшие, и дальше будет рассматриваться ТТТ-диаграмма».

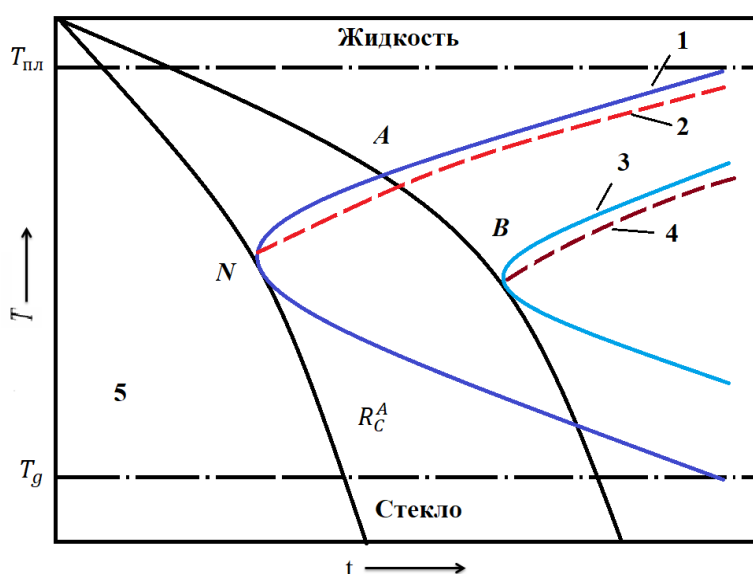


Рис. 1.2. Кристаллизация расплава:

1, 3 – ТТТ-диаграммы начала кристаллизации (изотермические условия); 2, 4 – диаграммы начала кристаллизации при непрерывном охлаждении расплава; 5 – переохлажденный расплав.

На рис. 1.2 приведены ТТТ-диаграммы веществ А и В, которые существенно различаются: линия, отвечающая началу кристаллизации вещества В, смещена в сторону больших времен. Для стеклообразования обоих этих веществ требуются минимальные скорости охлаждения, определяемые по линиям, касающимся выступов диаграмм. При этих и больших скоростях охлаждения кристаллы не зарождаются, и переохлажденная жидкость сохраняется вплоть до температуры стеклования  $T_g$ , при которой она превращается в стекло. По ТТТ-диаграммам можно оценить критическую скорость охлаждения расплава  $R_c$  и, как видно из рисунка,  $R_c^A \geq$

$R_c^B$ . Таким образом, вещество А характеризуется меньшей способностью к стеклообразованию, чем вещество В.

Способность данного сплава к стеклообразованию можно оценить по критической скорости охлаждения, но необходимо учитывать то, что  $R_c$  зависит от температурной зависимости вязкости переохлажденного расплава и теплоты плавления сплава. Значения критической скорости охлаждения  $R_c$ , рассчитанные для некоторых металлов и сплавов, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Критическая скорость охлаждения при аморфизации.

Состав	$R_c$ , К/с		Состав	$R_c$ , К/с	
	Эксперимент	Расчет		Эксперимент	Расчет
Ni	-	$10^{10,5}$	Fe <sub>83</sub> B <sub>17</sub>	$10^{6,0}$	$10^{6,0}$
Ge	-	$10^{5,7}$	Fe <sub>80</sub> P <sub>13</sub> C <sub>7</sub>	$10^{4,8}$	$10^{4,4}$
Pd <sub>82</sub> Si <sub>18</sub>	$10^{4,7}$	$10^{3,3}$	Fe <sub>80</sub> P <sub>13</sub> B <sub>7</sub>	$10^{5,5}$	-
Pd <sub>78</sub> Si <sub>16</sub> Cu <sub>6</sub>	$10^{2,8}$	$10^{2,5}$	Fe <sub>80</sub> P <sub>13</sub> P <sub>7</sub>	$10^{4,9}$	-
Ni <sub>40</sub> Pd <sub>40</sub> P <sub>20</sub>	$10^{2,8}$	$10^{2,1}$	Fe <sub>79</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>11</sub>	-	$10^{5,3}$
Fe <sub>80</sub> P <sub>20</sub>	$10^{4,9}$	-	Fe <sub>75</sub> Si <sub>8</sub> B <sub>17</sub>	-	$10^{5,0}$
Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	$10^{5,4}$	-	Co <sub>75</sub> Si <sub>15</sub> B <sub>10</sub>	-	$10^{5,5}$

Из данных таблицы видно, что для стеклообразования сплавов требуются заметно меньшие скорости охлаждения расплава по сравнению с чистым металлом (например, никелем). «Это подтверждает известный факт, что способность металлов и сплавов к стеклообразованию зависит от их химического состава».

Общепринятыми критериями стеклообразующей способности расплавов являются не только критическая скорость охлаждения  $R_c$ , но и критический диаметр  $D_c$ , отражающий максимально возможную толщину получающихся в результате отливок с полностью аморфной структурой. Чем меньше значение  $R_c$  и больше значение  $D_c$ , тем выше стеклообразующая способность расплава. «Из этих двух критериев наиболее подходящим для отражения стеклообразующей способности расплава является критическая скорость  $R_c$ , так как критический диаметр  $D_c$  помимо зависимости от состава сплава зависит и от других факторов, например, от метода изготовления».

### 1.3. Приведенные температуры

Было отмечено, что аморфизация зависит от  $T_{пл}$  – температуры плавления сплава. Для описания склонности к аморфизации используют следующие приведенные температуры.

Приведенная температура стеклования  $T_{rg}$ , определяемая как отношение температуры стеклования к температуре плавления сплава вычисляется по формуле:

$$T_{rg} = \frac{T_g}{T_{пл}}. \quad (3)$$

Величина приведенной температуры стеклования обычно находится в интервале значений от 0,45 до 0,65 и зависит от энергии межатомной связи. Чем больше энергия связи атомов, тем больше  $T_g$  и  $T_{rg}$ . В целом, легирование сплава элементами, повышающими  $T_g$  и понижающими  $T_{пл}$ , благоприятно для стеклования. «Обычно температура  $T_g$  при легировании изменяется слабо, и поэтому роль легирования сводится к понижению  $T_{пл}$  конкретного сплава. Как известно из металловедения, наименьшей температурой плавления обладают эвтектики». Следовательно, выбрав эвтектику нужно найти такие легирующие элементы, которые бы понижали эвтектическую температуру  $T_e$  в меньшей степени, чем  $T_{пл}$ , и сохраняли заметную разность  $(T_{пл} - T_e)$ , связанную с критической скоростью  $R_c$ . Хотя имеются некоторые несоответствия, все же можно считать, что чем больше разность  $(T_{пл} - T_e)$ , тем меньшие критические скорости  $R_c$  требуются для стеклования сплава в эвтектической системе.

Приведенная температура плавления  $t_{пл}$ , определяется по формуле:

$$t_{пл} = \frac{k * T_{пл}}{\Delta H}, \quad (4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $\Delta H$  – теплота испарения. Приведенная температура используется при построении температурных зависимостей вязкости (и текучести) расплавов. «Для легкоаморфизуемых полимеров и силикатов наблюдается сильная зависимость вязкости (и текучести) от приведенной температуры. Для металлов эта зависимость слабая. В материаловедении известно, что чем меньше  $t_{пл}$ , тем выше стеклообразующая способность сплава».

Приведенная температура переохлаждения  $\Delta T_{mr}$ , определяется по формуле:

$$\Delta T_{mr} = \frac{(T_{пл}^I - T_{пл})}{T_{пл}^I}, \quad (5)$$

где  $T_{пл}^I$  – средняя температура плавления компонент А и В, т.е.

$$T_{пл}^I = 0,5(T_{пл}^A + T_{пл}^B), \quad (6)$$

где  $T_{пл}$  – температура плавления сплава данного состава.

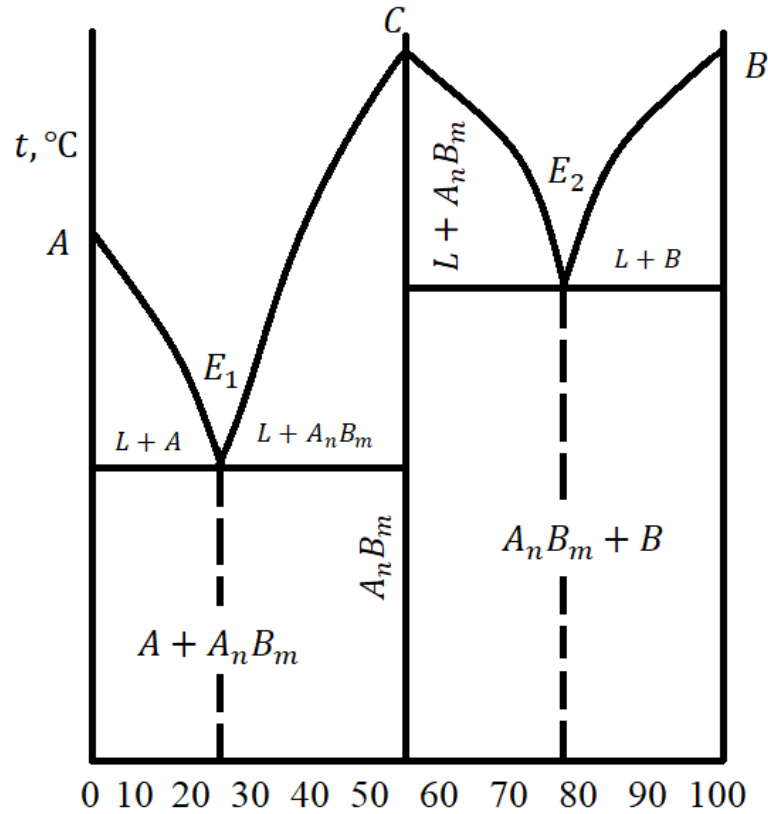


Рис. 1.3. Диаграмма состояния системы А–В с устойчивым химическим соединением  $A_nB_m$ .

В материаловедении известно, что чем больше  $\Delta T_{mr}$ , тем легче идет аморфизация. Для этого необходимо, чтобы температура плавления сплава была минимальной, а температуры плавления компонент сплава – максимальными, т.е.  $T_{пл} \Rightarrow \min$ , а  $T_{пл}^A$  и  $T_{пл}^B \Rightarrow \max$ . Этому требованию удовлетворяют эвтектические диаграмма состояния системы (ДСС), особенно ДСС с устойчивым одним или несколькими химическими соединениями, как это показано на рис.1.3.

Из рисунка видно, что температура плавления эвтектики А– $A_nB_m$  значительно ниже температуры плавления компонента А и особенно соединения  $A_nB_m$ . Наиболее легко стеклообразующий сплав лежит при концентрациях, соответствующих эвтектической

точке  $E_1$  и вблизи нее. В целом очевидно, что в результате анализа приведенных температур  $t_{пл}$ ,  $T_{пл}$ ,  $\Delta T_{mg}$  и ДСС можно оценить склонность сплава к стеклованию и выбрать аморфизируемые сплавы. Важно, что наиболее подходящими для стеклования являются эвтектики с минимумом  $T_e$  и максимумом  $T_{пл}^A$  и  $T_{пл}^B$ . «Это связано с тем, что кристаллизация эвтектик требует зарождения и роста кристаллов двух фаз (или больше), отличающихся по составу от эвтектической жидкости, т.е. требуется диффузионное перераспределение компонентов в процессе затвердевания. Поэтому при быстром охлаждении эвтектического расплава термодинамически выгоднее такому сплаву аморфизоваться».

#### 1.4. Физико-химические факторы стеклообразования

Среди факторов, влияющих на склонность металлов и сплавов к стеклообразованию, выделяют несколько групп параметров: термодинамические, кинетические, структурные, физико-химические.

Термодинамические параметры: температура ликвидуса, теплота испарения, теплота смещения, свободные энергии расплава и всех кристаллических фаз (стабильных и метастабильных), участвующих в процессе затвердевания. Особое место в этой группе занимают диаграммы состояния.

Кинетические параметры стеклообразующей способности: температура стеклования  $T_g$  и приведенная температура стеклования  $T_{rg} = T_g/T_l$  ( $T_l$  - температура плавления), вязкость расплава, скорость гомогенного зарождения. Все эти параметры связаны с энергетическими характеристиками системы. «Факторы, основным из которых является критическая скорость охлаждения расплава, обусловленные стеклообразующей способностью, являются кинетическими, базируются на анализе процессов образования и роста зародышей кристаллической фазы. Трудность определения количественных кинетических факторов состоит в том, что структура расплава и потенциальные барьеры непрерывно изменяются при охлаждении, что делает невозможным ни экспериментальное, ни теоретическое их определение».

Структурные параметры: наличие химического ближнего порядка в расплаве, присутствие в системе фаз со сложными кристаллическими решетками и большими координационными числами.

«Важнейшими среди известных физико-химических параметров являются: разница в атомных радиусах, различие в валентностях и в электроотрицательности, коэффициенты диффузии в расплаве, потенциал ионизации, концентрация валентных электронов, положение взаимодействующих элементов в периодической системе».

В реальности существует химическое взаимодействие между компонентами сплава. Оценка специфики химического взаимодействия компонентов сплава может дать наиболее обоснованные критерии оценки стеклообразующей способности. В отличие от однокомпонентных, в многокомпонентных сплавах, например, переходных металлов, современная квантовая химия не в состоянии выделить составляющие химической связи и рассчитать параметры ближнего порядка.

Большинство факторов, влияющих на стеклообразующую способность, взаимосвязаны и не могут полностью определить ее в каждом конкретном случае. В настоящее время не существует также и единого универсального критерия стеклообразования металлических сплавов. На способность к стеклообразованию влияют индивидуальные свойства атомов компонентов, условия взаимодействия.

## **1.5. Методы получения аморфных металлических сплавов**

Аморфную структуру в металлических сплавах получают различными методами: осаждения из газовой фазы или жидкого раствора, ионной имплантации и др. «Однако важнейшим является метод закалки расплава, позволяющий получать аморфные сплавы в виде изолированных ленточных, проволочных, а иногда и массивных образцов в широком интервале составов. Рассмотрим наиболее распространенные методы».

1. В методах осаждения из газовой фазы атомы или ионы металла (получаемые термическим испарением, катодным распылением и т.п.) осаждаются в вакуумной камере на охлаждаемую до



низких температур подложку. «В результате можно получить тонкую аморфную плёнку толщиной до 10...100 нм. При этом плёнка оказывается загрязнена атомами остаточных газов, неизбежно присутствующих в вакуумной камере». В случае использования термического испарения так удаётся получить в аморфном состоянии даже чистые металлы (Fe, Ni, Al, W и др.). Использование скоростного плазменного осаждения позволяет увеличить толщину плёнки до нескольких миллиметров и повысить её чистоту.

2. При ионной имплантации поверхность обычного кристаллического металла облучают ионами, внедряющимися в неё и при достаточно больших дозах (по меньшей мере, одно смещение на атом) нарушающими кристаллический порядок. «Бомбардировка собственными ионами не создаёт стабильной аморфной структуры, однако при имплантации ионов элементов, стабилизирующих аморфное состояние (например, фосфора), можно получить на поверхности тонкий - менее 1 мкм - стеклообразный слой».

3. Одновалковое спиннингование – это процесс затвердевания расплава на быстро вращающемся барабане-холодильнике. При двухвалковом спиннинговании расплав выливается в зазор между ними. Установка для одновалкового спиннингования «Кристалл-702» показана на рис. 1.4.

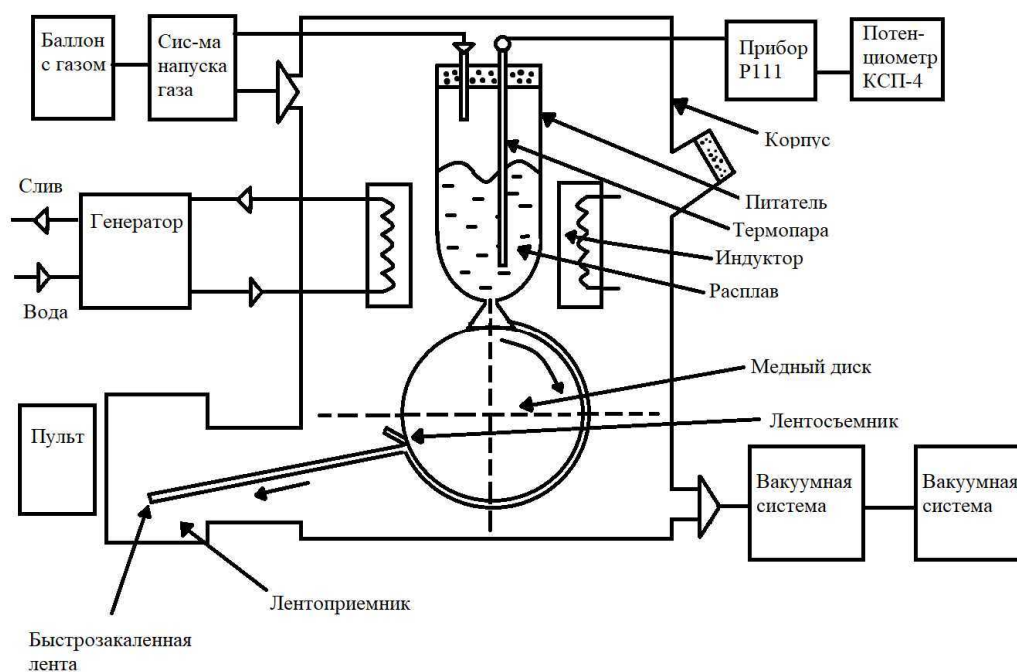


Рис. 1.4. Схема установки «Кристалл-702».

На установке «Кристалл-702» можно получать многометровые куски быстрозакаленной ленты толщиной 10–100 мкм и шириной до 50 мм.

При получении ленты расплав выдавливается под давлением из сопла на поверхность вращающегося охлаждающего тела (отсюда термин «спиннинг», spinning). При центробежной закалке на внешней или внутренней поверхности диска охлаждение расплава происходит только с одной стороны, а при охлаждении в двух валках - с обеих сторон. В первом случае возникают трудности с обеспечением качества внешней поверхности ленты, а во втором требуется более сложное оборудование и труднее становится управлять процессом. Наиболее распространён метод закалки на внешней поверхности вращающегося медного барабана. Как правило, скорость вращения холодильника подбирают так, чтобы отвод тепла происходил быстрее, чем движется расплав, то есть происходило вытягивание уже затвердевшей ленты со дна лужицы жидкого металла. Обычно скорость вытягивания ленты составляет 10...50 м/с; при этом скорость охлаждения достигает  $10^5 \dots 10^6$  К/с, а толщина получаемой ленты 10...50 мкм. Для получения аморфной ленты могут использоваться также методы экстракции расплава.

«Получить аморфную проволоку (круглого сечения диаметром 100...200 мкм) несколько сложнее. Этого можно добиться, например, вытягивая расплавленный металл в трубке через охлаждающую жидкость или подавая струю расплавленного металла либо в охлаждающую газообразную среду, либо в жидкость, удерживаемую центробежной силой на внутренней поверхности вращающегося барабана. При этом обеспечивается меньшая скорость охлаждения, чем при получении ленты ( $10^4 \dots 10^5$  К/с), и круг сплавов, которые можно стекловать, сужается».

4. «Расплющивание капли металла (сплава) между 84 массивными медными холодильниками по принципу «молот и наковальня», в результате которого происходит быстрое затвердевание капли со скоростью  $10^{5-8}$  К/с в виде фрагмента пленки толщиной порядка 60 мкм».

Способность различных материалов к стеклообразованию может быть предварительно рассчитана, исследовав критический

диаметр ( $D_{\max}$ ) изготовленного твердого тела и определив критические скорости охлаждения, требуемые для производства в промышленном масштабе. Сплав, обладающий более высокой способностью к стеклообразованию, может быть получен с превосходящими обычными стали свойствами и в больших количествах. Огромные усилия многих исследователей были направлены на изучение различных критериев для оценки свойств стеклообразования сплавов, чтобы понять, почему некоторые составы легко находятся в аморфной фазе, а в другом случае – они едва возможны. Во многих работах было предложено измерять много факторов, например, критерии Иноуэ, способных предсказать свойства стеклообразования, указывая на формирование стекла, однако они не рассматривали кинетику стеклянного формирования.

## 1.6. Критерии Иноуэ

А. Иноуэ является первооткрывателем материалов на основе объемных металлических стекол. За свои достижения в этой области был награжден большим количеством премий. А. Иноуэ исследовал и разрабатывал технологии получения, структуру, структурную релаксацию, тепловую стабильность, механические, химические свойства и магнитные характеристики аморфных сплавов (1974-настоящее время), нанокристаллических сплавов (1987-настоящее время), наноквазикристаллических сплавов (1989-2011) и объемных металлических стекол (1988-настоящее время). В результате А. Иноуэ удалось осуществить коммерциализацию этих неравновесных сплавов в качестве структурных материалов, датчиков и мягких магнитных материалов с торговыми марками: SENCY и BOLHER (аморфные магнитные провода на основе железа), GIGAS и SUMIALTOUGH (высокопрочные нанокристаллические сплавы на основе алюминия). А также NANOPERM (нанокристаллические магнитомягкие сплавы на основе железа), LIQUALLOY и SENNTIX (Fe-основе магнитомягкие объемные металлические стекла на основе железа), AMO (аморфные сферы из высокопрочных железных сплавов) и GLASS-COAT (антикоррозионное аморфное покрытие и лист на основе железа).

Последние 15 лет ученый занимался изучением стеклообразующей способности, термостабильности, механических свойств,

коррозионного поведения, магнитомягких свойств и применения объемных стекловидных сплавов на основе железа.

На основе обширных данных, полученных при синтезе объемных металлических стекол в течение более чем десятилетия, Иноуэ сформулировал три основных эмпирических правила для прогнозирования стеклообразующей способности, которые называются критерии Иноуэ:

1. Сплав должен содержать, по меньшей мере, три компонента. Образование стекла становится легче с увеличением количества компонентов в системе сплава;

2. Должна существовать значительная разница в атомных размерах между составляющими элементами в сплаве. Предполагается, что различия в атомных размерах должны быть выше  $\approx 12\%$  среди основных составляющих элементов;

3. Должна существовать отрицательная теплота смешивания между (основными) составляющими элементами в системе сплава.

Эти правила имеют огромное значение для определения составов сплавов для синтеза металлических стекол, хотя для этих эмпирических правил были найдены некоторые очевидные исключения. Например, отмечалось, что металлические стекла, образованные в системах бинарных сплавов, таких как Ca–Al, Cu–Hf, Cu–Zr, Ni–Nb, и Pd–Si. Но толщина сечения этих стекол обычно невелика, то есть обычно максимум составляет всего около 1-2 мм. Однако можно отметить, что при добавлении большего количества легирующих элементов стеклообразующая способность этих сплавов может значительно улучшаться, что приводит к образованию стекол с большей толщиной сечения. С увеличением числа разновидностей сплавов, было отмечено, что некоторые из систем сплавов не соответствуют вышеупомянутым критериям Иноуэ.

Таким образом, в дополнение к вышеуказанным общим критериям, которые были широко приняты исследователями и в основном соблюдались в большинстве случаев сплавных систем, был разработан ряд новых критериев. С 2003 года был разработан ряд новых критериев, основанных на тепловых свойствах сплавов и физических характеристиках. К ним относятся так называемые  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma_m$ ,  $\delta$ ,  $\phi$  и другие параметры.

Таблица.1.2

Количественные характеристики для оценки стеклообразующих способностей сплавов.

Параметр	Уравнение	
Приведенная температура стеклования	$T_{rg} = \frac{T_g}{T_l}$	(7)
$\Delta T_x$	$\Delta T_x = T_x - T_g$	(8)
$\alpha$	$\alpha = \frac{T_x}{T_l}$	(9)
$\beta$	$\beta = 1 + \frac{T_x}{T_l} = 1 + \alpha$	(10)
New $\beta$	$\beta = \frac{T_x \cdot T_g}{(T_l - T_x)^2}$	(11)
$\gamma$	$\gamma = \frac{T_x}{T_g + T_l}$	(12)
$\gamma_m$	$\gamma_m = \frac{2T_x - T_g}{T_l}$	(13)
$\delta$	$\delta = \frac{T_x}{T_l - T_g}$	(14)
$K_{gl}$	$K_{gl} = \frac{T_x - T_g}{T_m - T_x}$	(15)
$\varphi$	$\varphi = T_{rg} \left( \frac{\Delta T_x}{T_g} \right)^{0.143}$	(16)
$T_{rx}$	$T_{rx} = \frac{T_x}{T_s}$	(17)
$\omega$	$\omega = \frac{T_g}{T_x} - \frac{2T_g}{T_g + T_l}$	(18)

В таблице 1.2 обобщены различные критерии, разработанные для рационализации и прогнозирования стеклообразующей способности сплавов. Несмотря на такое большое количество параметров, прогнозируемые способности стеклообразования существенно не улучшились, и возникли сложности с определением составов сплавов, которые будут производить стеклообразующие фазы сплава. Кроме того, применимость этих новых критериев ограничивается в большинстве случаев несколькими типичными

системами сплавов. То есть большинство этих новых критериев соблюдаются в ограниченном числе систем. При разработке и анализе сплавов металлических стекол экспериментаторы использовали не кинетические, а исключительно структурные критерии (включая три вышеприведенных эмпирических правила) ввиду их простоты и широкой применимости к реальным системам сплавов.

### **Контрольные вопросы**

1. Кем впервые был получен металлический сплав в некристаллическом состоянии?
2. Какие условия необходимо соблюдать, для того чтобы при непрерывном охлаждении жидкость могла перейти в твердое кристаллическое состояние?
3. Чем отличается процесс кристаллизации и стеклования?
4. Что называют температурой стеклования?
5. Раскройте смысл понятия «переохлажденная жидкость»
6. Какие процессы протекают при охлаждении переохлажденной жидкости?
7. Нарисуйте ТТТ-диаграмму. Раскройте ее физический смысл.
8. Назовите основные критерии стеклообразования. Сформулируйте определение критериев.
9. Как связаны между собой температура плавления и температура стеклования? Легирование сплава элементами влияет на процесс аморфизации?
10. Нарисуйте диаграмму состояния системы А-В. Раскройте ее физический смысл.
11. Перечислите группы параметров влияющих на склонность металлов и сплавов к стеклообразованию. Раскройте их.
12. Кратко охарактеризуйте методы получения аморфных металлических сплавов.
13. Кто является первооткрывателем материалов на основе объемных металлических стекол?
14. Сформулируйте три основных эмпирических правила для прогнозирования стеклообразующей способности?
15. Сколько количественных характеристик для оценки стеклообразующих способностей сплавов? Перечислите их.

## Глава 2. Учебно-методические материалы по теме «Стеклообразующая способность расплавов»

### 2.1. Пояснительная записка

Учебно-методические материалы включают в себя три блока разно уровневых задач, которые позволят обучающимся сформировать представление о стеклообразующих параметрах, их корреляцию с другими величинами, а также выработать практические навыки расчёта.

Первый блок учебных задач направлен на количественный расчет стеклообразующих параметров различных сплавов. В ходе решения задач студенты эмпирически установят взаимосвязь между параметрами, используя практические навыки и несложные математические расчеты, смогут вывести основные формулы по стеклообразующей способности расплавов.

Второй блок состоит из заданий, которые позволят установить графическую зависимость между основными параметрами стеклования. В ходе выполнения заданий студентам необходимо построить графики зависимостей различных температур, например, температуры стеклования и температуры начала кристаллизации. Данный блок позволяет обучающимся сформировать целостное представление об основных процессах и закономерностях стеклообразования.

Третий блок направлен на прогнозирование основных критериев стеклообразования при некоторых известных параметрах стеклования. В данном блоке студентам предлагается спрогнозировать критическую скорость охлаждения и критический диаметр, имея исходный набор стеклообразующих параметров или температур. Такой уровень заданий является повышенным и учитывает все знания и умения, накопленные в ходе отработанных практических навыков в предыдущих блоках.

## Справочный материал

Таблица 2.1

Количественные характеристики для оценки стеклообразующих способностей сплавов.

Параметр	Уравнение	
Приведенная температура стеклования	$T_{rg} = \frac{T_g}{T_l}$	1
$\Delta T_x$	$\Delta T_x = T_x - T_g$	2
$\alpha$	$\alpha = \frac{T_x}{T_l}$	3
$\beta$	$\beta = 1 + \frac{T_x}{T_l} = 1 + \alpha$	4
New $\beta$	$\beta = \frac{T_x \cdot T_g}{(T_l - T_x)^2}$	5
$\gamma$	$\gamma = \frac{T_x}{T_g + T_l}$	6
$\gamma_m$	$\gamma_m = \frac{2T_x - T_g}{T_l}$	7
$\delta$	$\delta = \frac{T_x}{T_l - T_g}$	8
$\varphi$	$\varphi = T_{rg} \left( \frac{\Delta T_x}{T_g} \right)^{0.143}$	9
$\omega$	$\omega = \frac{T_g}{T_x} - \frac{2T_g}{T_g + T_l}$	10



## Обозначения

$T_{rg}$  – приведенная температура стеклования

$T_g$  – температура стеклования

$T_l$  – температура ликвидуса

$T_x$  – температура начала кристаллизации

$R_c$  – критическая скорость охлаждения

$D_{max}$  – критический диаметр

$\frac{T_x}{T_g}$  – термостойкость стекла

## 2.2. Задачи для практических занятий

### Блок №1

1. Величина температуры ликвидуса для сплава  $Pd_{82}Si_{18}$  составляет 1071 К, а температура начала кристаллизации аморфного сплава 648 К. Определите параметр для оценки стеклообразующей способности  $\beta$ .

2. Известно, что при температуре ликвидуса для сплава  $Zr_{66}Al_8Ni_{26}$  равной 1251 К, параметр  $\alpha$  составляет 0.566. Определите температура стеклования сплава, если параметр  $\gamma$  равен 0.368.

3. Сплав  $La_{55}Al_{25}Ni_{15}Cu_5$  начинает кристаллизоваться при температуре 514.2 К. Необходимо найти температуру ликвидуса, если известно, что параметр  $\beta$  равен 1.669.

4. Процесс стеклования сплава  $Ti_{34}Zr_{11}Cu_{47}Ni_8$  начинается при температуре 698.4 К, при этом ширина области переохлажденной жидкости составляет 28.8К. Рассчитайте параметр для оценки стеклообразующей способности  $\omega$ , температуру ликвидуса считать равной 1169.2 К.

5. Определить термостойкость стекла  $Mg_{70}Ni_{15}Nd_{15}$ . Приведенную температуру стеклования данного сплава считать равной 0.553, а параметр  $\alpha$  равен 0.579.

6. Расплав  $Mg_{65}Cu_{25}Y_{10}$  охлаждается с температуры ликвидуса равной 760К с необходимой критической скоростью на 347 К. По-

сле охлаждения начинается процесс стеклования. Определите температуру начала кристаллизации системы, если сплав начнут нагревать, параметр  $\gamma$  считать равным 0.403.

7. Известно, что сплав  $\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{20}$ , имеющий параметр стеклообразующей способности  $\alpha$  равный 0.590, начинает кристаллизоваться при температуре 555 К. Рассчитайте параметр для оценки стеклообразующей способности  $\beta$ , если  $\Delta T_x$  составляет 64К.

8. Определите параметр для оценки стеклообразующей способности  $\varphi$ , если известно, что приведенная температура стеклования составляет 0.54. Температура начала кристаллизации больше температуры стеклования на 54 К. Температуру стеклования считать равной 395К.

9. Величина температуры ликвидуса сплава  $\text{Ca}_{65}\text{Mg}_{15}\text{Zn}_{20}$  составляет 630 К. Определите параметр для оценки стеклообразующей способности  $\gamma_m$ , если температура стеклования равна 375 К, а ширину области переохлажденной жидкости считать равной 35 К.

10. Дан сплав  $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ , термостойкость которого равна 1.108. Рассчитайте приведенную температуру стеклования, если известно, что параметр  $\alpha$  принимает значение 0.672.

11. Сколько составляет ширина области переохлажденной жидкости сплава  $\text{Cu}_{60}\text{Hf}_{17.5}\text{Ti}_{22.5}$ , если параметр  $\alpha$  при температуре ликвидуса 1229 К составляет 0.614. Приведенная температура стеклования равна 0.569.

12. Температура ликвидуса сплава  $\text{Mg}_{65}\text{Cu}_{15}\text{Ag}_5\text{Pd}_5\text{Gd}_{10}$  составляет 748 К, а приведенная температура стеклования 0.575. Определите параметр стеклообразования  $\delta$ , если аморфный сплав начинает кристаллизоваться при температуре 472 К.

13. Рассчитайте параметр  $\alpha$ , если температура ликвидуса сплава  $\text{Ca}_{60}\text{Al}_{30}\text{Ag}_{10}$  868 К. Известно, что температура начала кристаллизации аморфного сплава равна 531 К.

14. При температуре 399 К в сплаве  $\text{Ca}_{40}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{35}$  начинается процесс стеклования. Определите параметр  $\gamma$ , если известно, что температура ликвидуса равна 680 К. Ширину области переохлажденной жидкости считать равной 37.

15. При какой температуре аморфный сплав  $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$  начнется кристаллизоваться, если температура стеклования равна 713К. Известно, что параметр  $\omega$  принимает значение 0.186, а температура ликвидуса 1151 К.

## Блок №2

Задания выполняется в Graph – программа с открытым кодом, предназначенная для построения математических графиков.

16. Необходимо в программе Graph построить график зависимости параметра  $\alpha$  от стеклообразующего параметра  $\beta$ . Запишите функцию зависимости.

№	Сплав	$\alpha$	$\beta$
1	$\text{Zr}_{66}\text{Al}_8\text{Ni}_{26}$	0.56563	1.5901
2	$\text{Zr}_{66}\text{Al}_8\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{14}$	0.62495	1.6771
3	$\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{15}\text{Cu}_5$	0.6016	1.6692
4	$\text{Ni}_{59}\text{Zr}_{16}\text{Ti}_{13}\text{Si}_3\text{Sn}_2\text{Nb}_7$	0.68025	1.6968
5	$\text{Ti}_{34}\text{Zr}_{11}\text{Cu}_{47}\text{Ni}_8$	0.62196	1.6386
6	$\text{Pd}_{82}\text{Si}_{18}$	0.60504	1.605
7	$\text{Mg}_{65}\text{Cu}_{7.5}\text{Ni}_{7.5}\text{Zn}_5\text{Ag}_5\text{Y}_{10}$	0.64714	1.6833

17. Установите взаимосвязь между критической скоростью охлаждения  $R_c$  (К/с) и критическим диаметром  $D_{\max}$ . Так же с помощью регрессионного анализа запишите функцию зависимости.

№	Сплав	$R_c$ (К/с)	$D_{\max}$ (мм)
1	$\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$	0.1	72
2	$\text{Ti}_{34}\text{Zr}_{11}\text{Cu}_{47}\text{Ni}_8$	100	4.5
3	$\text{Mg}_{65}\text{Cu}_{7.5}\text{Ni}_{7.5}\text{Zn}_5\text{Ag}_5\text{Y}_{10}$	50	9
4	$\text{Mg}_{70}\text{Ni}_{15}\text{Nd}_{15}$	178.2	1.5
5	$\text{Mg}_{65}\text{Cu}_{25}\text{Y}_{10}$	50	4
6	$\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{20}$	67.5	3
7	$\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Cu}_{20}$	72.3	3

18. Определите зависимость приведенной температуры стеклования  $T_{rg}$  и критической скорости охлаждения  $R_c$ , построив график по заданным значениям.

№	Сплав	$T_{rg}$	$R_c$ (К/с)
1	Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	0.68458	0.1
2	Ti <sub>34</sub> Zr <sub>11</sub> Cu <sub>47</sub> Ni <sub>8</sub>	0.59733	100
3	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>7.5</sub> Ni <sub>7.5</sub> Zn <sub>5</sub> Ag <sub>5</sub> Y <sub>10</sub>	0.59414	50
4	Mg <sub>70</sub> Ni <sub>15</sub> Nd <sub>15</sub>	0.55332	178.2
5	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>25</sub> Y <sub>10</sub>	0.54342	50
6	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>20</sub>	0.52179	67.5
7	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Cu <sub>20</sub>	0.54036	72.3

19. Постройте график зависимости критического диаметра  $D_{max}$  (мм) и параметра для оценки стеклообразования  $\beta$ . Данные приведены в таблице.

№	Сплав	$\beta$	$D_{max}$ (мм)
1	Ca <sub>66.4</sub> Al <sub>33.6</sub>	1.6275	1
2	Ca <sub>60</sub> Al <sub>30</sub> Ag <sub>10</sub>	1.6558	2
3	Ca <sub>63</sub> Al <sub>32</sub> Cu <sub>5</sub>	1.6376	2
4	Ca <sub>40</sub> Mg <sub>25</sub> Cu <sub>35</sub>	1.6795	4
5	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>5</sub> Pd <sub>5</sub> Gd <sub>10</sub>	1.6725	10
6	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>10</sub> Y <sub>2</sub> Gd <sub>8</sub>	1.7197	9
7	Pd <sub>79.5</sub> Cu <sub>4</sub> Si <sub>16.5</sub>	1.6524	0.75

20. С помощью регрессионного анализа определите зависимость критической скорости охлаждения  $R_c$  и параметра для оценки стеклообразования  $\beta_1$ . Данные приведены в таблице.

№	Сплав	$\beta_1$	$R_c$ (К/с)
1	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Ni <sub>26</sub>	1.6103	66.6
2	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>14</sub>	2.4831	9.8
3	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>15</sub> Cu <sub>5</sub>	1.9954	34.5
4	Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	10.068	0.1
5	Ti <sub>34</sub> Zr <sub>11</sub> Cu <sub>47</sub> Ni <sub>8</sub>	2.5996	100
6	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>7.5</sub> Ni <sub>7.5</sub> Zn <sub>5</sub> Ag <sub>5</sub> Y <sub>10</sub>	3.0881	50
7	Ni <sub>59</sub> Zr <sub>16</sub> Ti <sub>13</sub> Si <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> Nb <sub>7</sub>	4.3213	40

21. Постройте график зависимости критического диаметра  $D_{max}$  и параметра  $\omega$  по заданным значениям. Запишите функцию зависимости.

№	Сплав	$\omega$	$D_{max}$ (мм)
1	Ca <sub>66.4</sub> Al <sub>33.6</sub>	0.22403	1
2	Ca <sub>60</sub> Al <sub>30</sub> Ag <sub>10</sub>	0.19458	2
3	Ca <sub>63</sub> Al <sub>32</sub> Cu <sub>5</sub>	0.21649	2
4	Ca <sub>40</sub> Mg <sub>25</sub> Cu <sub>35</sub>	0.17556	4
5	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>5</sub> Pd <sub>5</sub> Gd <sub>10</sub>	0.18096	10
6	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>10</sub> Y <sub>2</sub> Gd <sub>8</sub>	0.14361	9
7	Pd <sub>79.5</sub> Cu <sub>4</sub> Si <sub>16.5</sub>	0.19864	0.75

22. С помощью регрессионного анализа определите зависимость критической скорости охлаждения  $R_c$  и параметра для оценки стеклообразования  $\gamma$ . Данные приведены в таблице.

№	Сплав	$\gamma$	$R_c$ (К/с)
1	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Ni <sub>26</sub>	0.36797	66.6
2	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>14</sub>	0.40089	9.8
3	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>15</sub> Cu <sub>5</sub>	0.39412	34.5
4	Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	0.4577	0.1
5	Ti <sub>34</sub> Zr <sub>11</sub> Cu <sub>47</sub> Ni <sub>8</sub>	0.38938	100
6	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>7.5</sub> Ni <sub>7.5</sub> Zn <sub>5</sub> Ag <sub>5</sub> Y <sub>10</sub>	0.40595	50
7	Ni <sub>59</sub> Zr <sub>16</sub> Ti <sub>13</sub> Si <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> Nb <sub>7</sub>	0.4124	40

23. Постройте график зависимости критического диаметра  $D_{max}$  и ширины области переохлажденной жидкости  $\Delta T_x$ . Данные приведены в таблице.

№	Сплав	$\Delta T_x$ (К)	$D_{max}$ (мм)
1	Ca <sub>66.4</sub> Al <sub>33.6</sub>	12	1
2	Ca <sub>60</sub> Al <sub>30</sub> Ag <sub>10</sub>	48	2
3	Ca <sub>63</sub> Al <sub>32</sub> Cu <sub>5</sub>	11	2
4	Ca <sub>40</sub> Mg <sub>25</sub> Cu <sub>35</sub>	37	4
5	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>5</sub> Pd <sub>5</sub> Gd <sub>10</sub>	42	10
6	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>10</sub> Y <sub>2</sub> Gd <sub>8</sub>	44	9
7	Pd <sub>79.5</sub> Cu <sub>4</sub> Si <sub>16.5</sub>	43	0.75

24. Определите зависимость параметра  $\varphi$  и критической скорости охлаждения  $R_c$ , построив график по заданным значениям.

№	Сплав	$\varphi$	$R_c$ (K/c)
1	Mg <sub>70</sub> Ni <sub>15</sub> Nd <sub>15</sub>	0.35746	178.2
2	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>25</sub> Y <sub>10</sub>	0.41241	50
3	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>20</sub>	0.3899	67.5
4	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Cu <sub>20</sub>	0.40654	72.3
5	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Ni <sub>26</sub>	0.3529	66.6
6	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>14</sub>	0.41181	9.8
7	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>15</sub> Cu <sub>5</sub>	0.39853	34.5

25. Постройте график зависимости критического диаметра  $D_{max}$  и параметра  $\delta$  по заданным значениям. Запишите функцию зависимости.

№	Сплав	$\delta$	$D_{max}$ (мм)
1	Ca <sub>66.4</sub> Al <sub>33.6</sub>	1.5652	1
2	Ca <sub>60</sub> Al <sub>30</sub> Ag <sub>10</sub>	1.3792	2
3	Ca <sub>63</sub> Al <sub>32</sub> Cu <sub>5</sub>	1.6395	2
4	Ca <sub>40</sub> Mg <sub>25</sub> Cu <sub>35</sub>	1.5516	4
5	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>5</sub> Pd <sub>5</sub> Gd <sub>10</sub>	1.4843	10
6	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>10</sub> Y <sub>2</sub> Gd <sub>8</sub>	1.7643	9
7	Pd <sub>79.5</sub> Cu <sub>4</sub> Si <sub>16.5</sub>	1.5033	0.75

26. Установите взаимосвязь между температурой ликвидуса  $T_l$  и температурой начала кристаллизации  $T_x$ . Так же с помощью регрессионного анализа запишите функцию зависимости.

№	Сплав	$T_l$ (K)	$T_x$ (K)
1	Ni <sub>60</sub> Nb <sub>40</sub>	1484	933
2	Ca <sub>65</sub> Mg <sub>15</sub> Zn <sub>20</sub>	630	410
3	Cu <sub>46</sub> Zr <sub>47</sub> Al <sub>7</sub>	1163	781
4	Cu <sub>60</sub> Zr <sub>30</sub> Ti <sub>10</sub>	1151	750
5	Cu <sub>55</sub> Zr <sub>42.5</sub> Ga <sub>2.5</sub>	1199	762
6	Cu <sub>60</sub> Hf <sub>17.5</sub> Ti <sub>22.5</sub>	1229	755
7	Ca <sub>66.4</sub> Al <sub>33.6</sub>	873	540

27. Постройте график зависимости температуры ликвидуса  $T_l$  и температуры стеклования  $T_g$  по заданным значениям. Запишите функцию зависимости.

№	Сплав	$T_l$ (К)	$T_g$ (К)
1	Ni <sub>60</sub> Nb <sub>40</sub>	1484	933
2	Ca <sub>65</sub> Mg <sub>15</sub> Zn <sub>20</sub>	630	375
3	Cu <sub>46</sub> Zr <sub>47</sub> Al <sub>7</sub>	1163	705
4	Cu <sub>60</sub> Zr <sub>30</sub> Ti <sub>10</sub>	1151	713
5	Cu <sub>55</sub> Zr <sub>42.5</sub> Ga <sub>2.5</sub>	1199	709
6	Cu <sub>60</sub> Hf <sub>17.5</sub> Ti <sub>22.5</sub>	1229	732
7	Ca <sub>66.4</sub> Al <sub>33.6</sub>	873	528

28. Определите зависимость температуры стеклования  $T_g$  и температурой начала кристаллизации  $T_x$ , построив график по заданным значениям.

№	Сплав	$T_x$ (К)	$T_g$ (К)
1	Ni <sub>60</sub> Nb <sub>40</sub>	933	933
2	Ca <sub>65</sub> Mg <sub>15</sub> Zn <sub>20</sub>	410	375
3	Cu <sub>46</sub> Zr <sub>47</sub> Al <sub>7</sub>	781	705
4	Cu <sub>60</sub> Zr <sub>30</sub> Ti <sub>10</sub>	750	713
5	Cu <sub>55</sub> Zr <sub>42.5</sub> Ga <sub>2.5</sub>	762	709
6	Cu <sub>60</sub> Hf <sub>17.5</sub> Ti <sub>22.5</sub>	755	732
7	Ca <sub>66.4</sub> Al <sub>33.6</sub>	540	528

29. С помощью регрессионного анализа определите зависимость критической скорости охлаждения  $R_c$  и температуры стеклования  $T_g$ . Данные приведены в таблице.

№	Сплав	$T_g$ (К)	$R_c$ (К/с)
1	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Ni <sub>26</sub>	672	66.6
2	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>14</sub>	655.1	9.8
3	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>15</sub> Cu <sub>5</sub>	473.6	34.5
4	Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	586	0.1
5	Ti <sub>34</sub> Zr <sub>11</sub> Cu <sub>47</sub> Ni <sub>8</sub>	698.4	100
6	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>7.5</sub> Ni <sub>7.5</sub> Zn <sub>5</sub> Ag <sub>5</sub> Y <sub>10</sub>	426	50
7	Ni <sub>59</sub> Zr <sub>16</sub> Ti <sub>13</sub> Si <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> Nb <sub>7</sub>	845	40

30. Установите взаимосвязь между критической скоростью охлаждения  $R_c$  и температурой начала кристаллизации  $T_x$ . Также

с помощью регрессионного анализа запишите функцию зависимости.

№	Сплав	$T_x$ (К)	$R_c$ (К/с)
1	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Ni <sub>26</sub>	707.6	66.6
2	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>14</sub>	732.5	9.8
3	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>15</sub> Cu <sub>5</sub>	514.2	34.5
4	Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	660	0.1
5	Ti <sub>34</sub> Zr <sub>11</sub> Cu <sub>47</sub> Ni <sub>8</sub>	727.2	100
6	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>7.5</sub> Ni <sub>7.5</sub> Zn <sub>5</sub> Ag <sub>5</sub> Y <sub>10</sub>	464	50
7	Ni <sub>59</sub> Zr <sub>16</sub> Ti <sub>13</sub> Si <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> Nb <sub>7</sub>	885	40

### Блок №3

Для прогнозирования стеклообразующей способности необходимо рассчитать критическую скорость охлаждения  $R_c$  (К/с) и критический диаметр  $D_{max}$  (мм). Использовать зависимости, полученные в блоке №2.

Задание. Оцените стеклообразующую способность сплава. Известно, что некоторые величины принимают следующие значения:  
31.

Сплав	$\gamma$	$\Delta T_x$ (К)
Mg <sub>75</sub> Ni <sub>15</sub> Nd <sub>10</sub>	0.37903	20

32.

Сплав	$T_{rg}$	$\omega$
Ca <sub>65</sub> Mg <sub>15</sub> Zn <sub>20</sub>	0.59524	0.16837

33.

Сплав	$T_g$ (К)	$\beta$
Mg <sub>65</sub> Cu <sub>25</sub> Y <sub>10</sub>	413	1.6887

34.

Сплав	$\varphi$	$\delta$
La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>20</sub>	0.3899	1.2333

35.

Сплав	$T_g$ (К)	$\Delta T_x$ (К)
Ti <sub>34</sub> Zr <sub>11</sub> Cu <sub>47</sub> Ni <sub>8</sub>	698.4	28.8



## **2.4. Рекомендации по использованию учебно-методических материалов**

Учебно-методические материалы по теме «Стеклообразующая способность расплавов» рекомендуется использовать при проведении практических занятий с обучающимися кафедры общей физике ВГПУ в рамках преподавания дисциплины «Физика некристаллических твердых тел». Комплекс заданий предназначен для отработки практических навыков решения задач, формирования логического мышления студентов.

Именно в процессе решения количественных задач, построении графиков по заданным параметрам начинает формироваться целостное, комплексное представление о стеклообразовании на качественном уровне.

Первый блок направлен на количественный расчет стеклообразующих параметров различных сплавов. Использование задач из данного блока предназначено для первичной отработки базовых знаний по дисциплине. Рекомендуется в качестве использования для проведения письменного контроля, самоконтроля, а также во время практических занятий. Для усвоения практических навыков студентов на начальном этапе изучения нового материала следует организовать совместное решение и разбор конкретных задач с обязательным участием одного из студента у доски, сопровождающееся комментированием при необходимости. Помимо этого, может быть реализована и работа в группах по решению задач. При решении задач первого блока важно постоянно акцентировать внимание студентов на установлении взаимосвязи некоторых параметров.

Более того, необходимо и достаточно, чтобы в процессе решения задач из первого блока студенты не только знали корреляцию между параметрами, но и четко осознавали, что данные параметры связаны и с главными критериями стеклообразования. Благодаря этому блоку задач и формируются фундаментальные представления о таких величинах, температура ликвидуса, температура стеклования, ширина области переохлажденной жидкости т.д.

Второй блок направлен на построение графиков и установление с помощью регрессионного анализа функции зависимости. Предполагается самостоятельная работа за компьютером. Задания

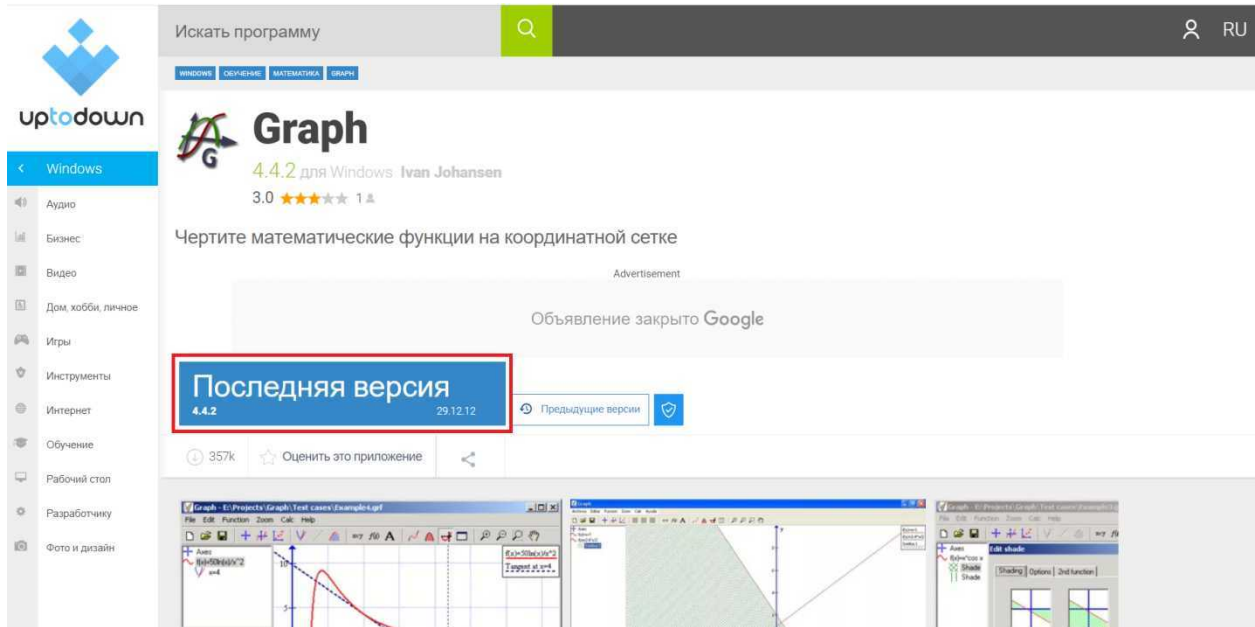
выполняется при помощи Graph – компьютерной программы с открытым кодом, предназначенной для построения математических графиков. Перед началом выполнения студентам необходимо установить соответствующую программу и изучить инструкцию по созданию графиков и нахождению функции зависимости. На данном этапе решения задач необходимо подчеркнуть то, что критическая скорость охлаждения и критический диаметр являются основными информативными величинами для оценки стеклообразующей способности. Поэтому все функции зависимости строятся для этих величин. На этапе использования задач второго блока формируется наглядно-образное мышление, а также умения и навыки, позволяющие спрогнозировать графический результат зависимостей величин.

Последним этапом формирования комплексных представлений станет этап прогнозирования стеклообразующей способности конкретных сплавов. Для более эффективной работы рекомендуется разбить группу студентов на микрогруппы по 2-4 человека. Это позволит создать почву для обсуждений, тем самым развить коммуникативные навыки обучающихся, повысить интерес к теме. На начальном этапе работы следует обратить внимание студентов, что для прогнозирования стеклообразующей способности им необходимо рассчитать критическую скорость охлаждения  $R_c$  (К/с) и критический диаметр  $D_{max}$  (мм).

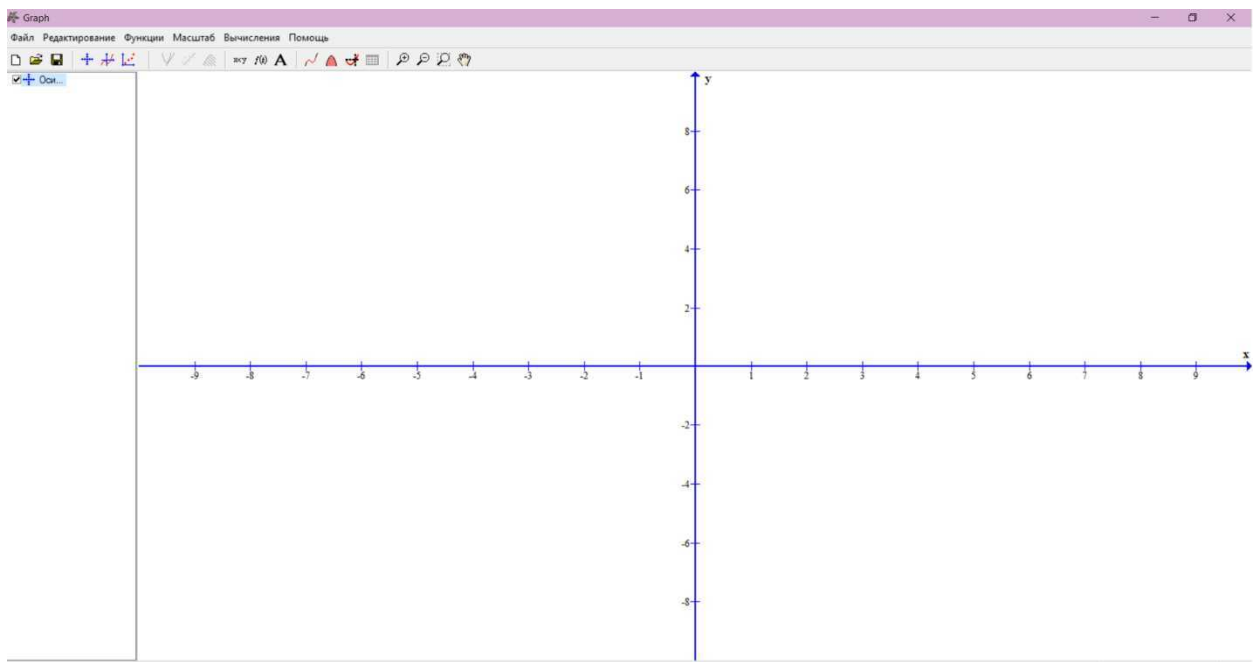
Каждая группа после выполнения задания может выбрать студента, который публично представит результаты обсуждения, на качественном уровне аргументирует точку зрения микрогруппы.

## Инструкция по установке

1. Необходимо зайти на сайт:  
<https://graph.ru.uptodown.com/windows>

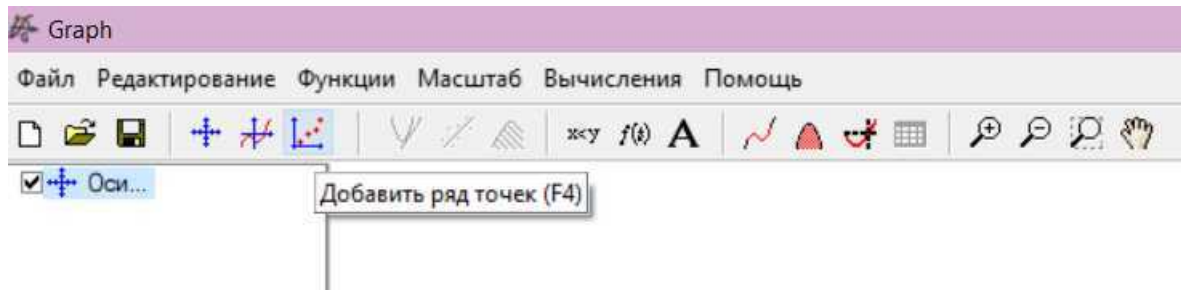


2. Выбрать «Последняя версия», скачиваем приложение и устанавливаем его.
3. Диалоговое окно программы.

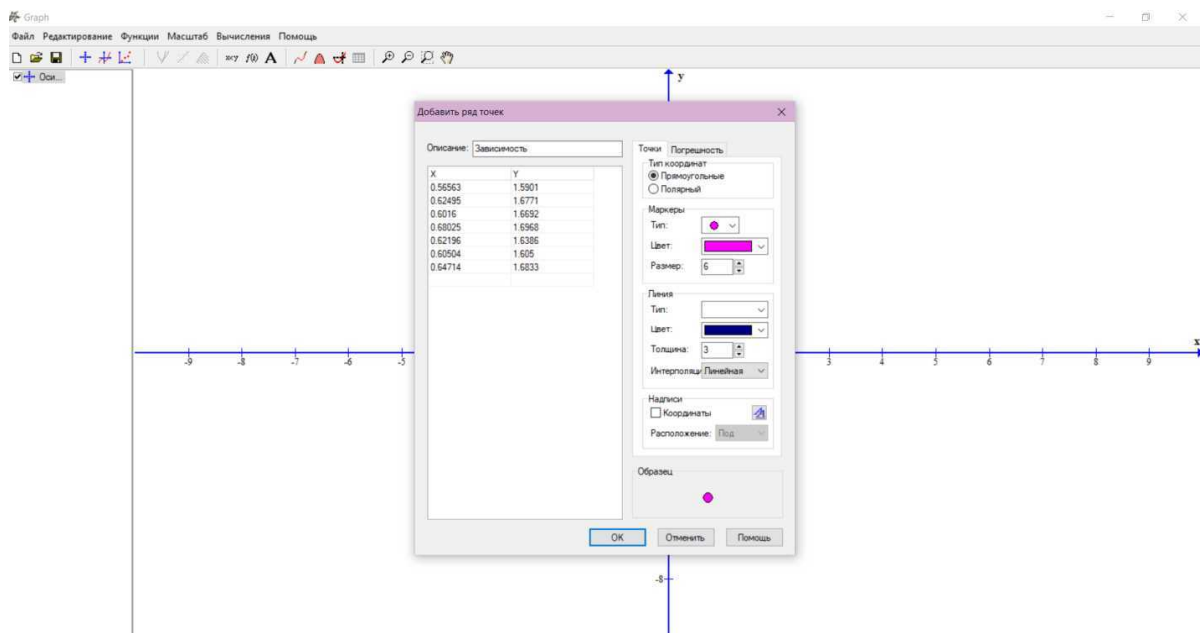


### Краткое руководство по созданию графиков в Graph.

1. Для того чтобы создать график по точкам необходимо выбрать на панели инструментов «Добавить ряд точек»



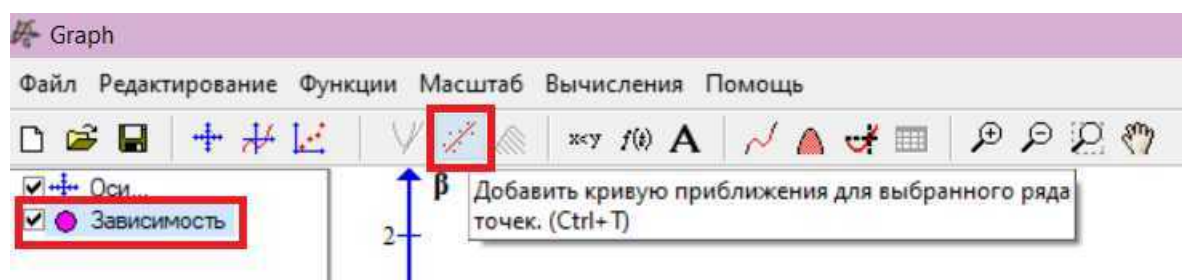
2. В открывшемся окне необходимо добавить соответствующие значения, например, параметров  $\alpha$  и  $\beta$  (задача №1). После заполнения выбираем нужные характеристики маркеров и линий.



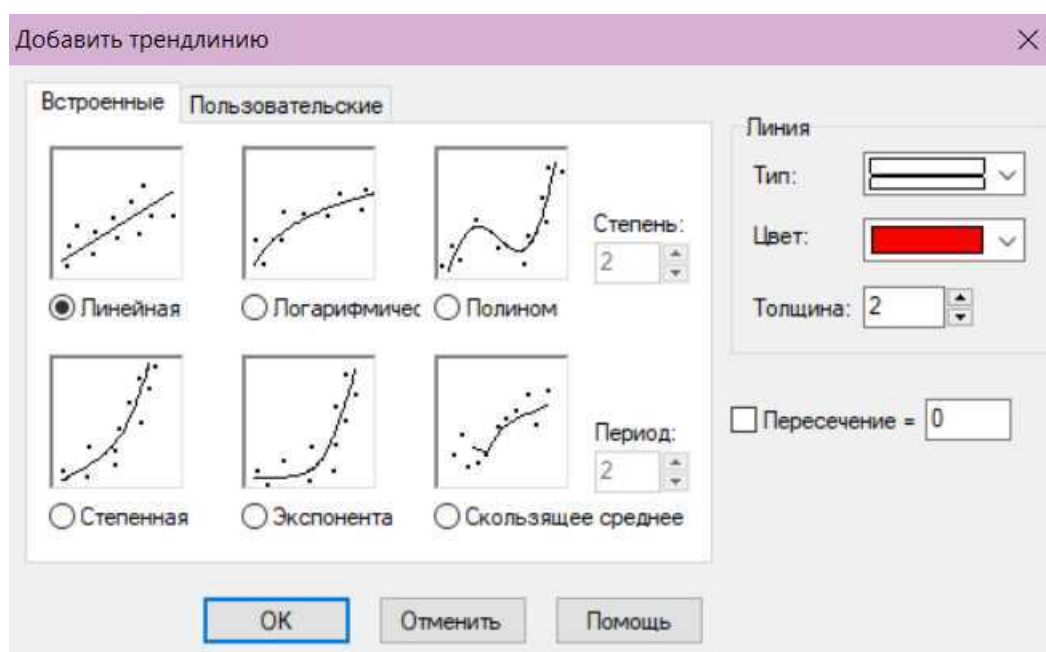
3. Для изменения названия осей выбираем на панели инструментов «Редактировать параметры осей» или комбинация клавиш Ctrl+A. В открывшемся окне для оси x меняем обозначение на  $\alpha$ . Для оси y соответственно  $\beta$ .

4. Для определения зависимости параметров используется регрессионный анализ. Для этого необходимо построить тренд-линию. Для начала выбираем график «Зависимость» далее на панели

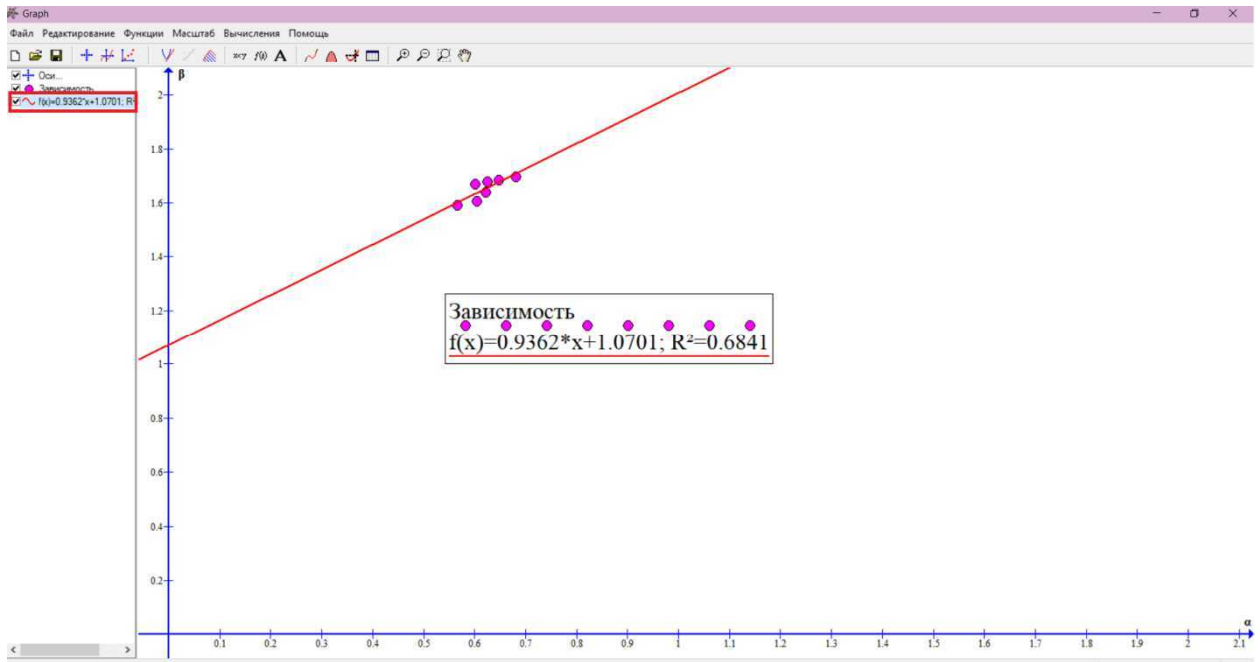
инструментов нужно найти «Добавить кривую приближения для выбранного ряда точек» или сочетание клавиш Ctrl+T.



5. Открылось диалоговое окно «Добавить трендлинию». Необходимо с помощью подбора найти наиболее подходящую. В данном примере используем линейную зависимость. Устанавливаем нужные характеристики линии.



6. Для того чтобы изменить название переменной в функции, необходимо использовать двойной клик по функции. После сего откроется окно «Редактировать функцию». В разделе «Текст подписи» «Описание» необходимо  $x$  заменить на соответствующую переменную  $a$ .



## 7. Конечный вид.

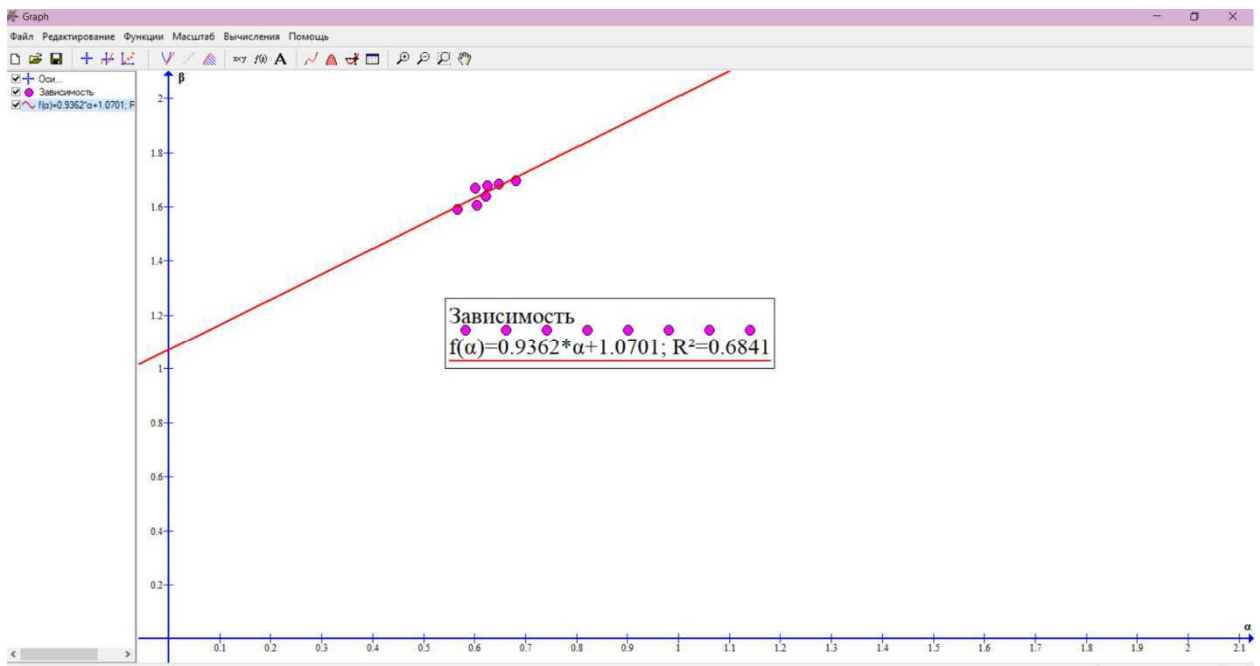


Таблица значений стеклообразующих параметров аморфных расплавов

№	Сплав	$T_{rg}$	$T_g(K)$	$T_l(K)$	$T_x(K)$	$R_c$ (K/c)	$D_{max}$ (мм)	$\Delta T_x(K)$	$\alpha$	$\beta$	New $\beta$	$\gamma$	$\gamma_m$	$\delta$	$\varphi$	$\omega$
1	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Ni <sub>26</sub>	0.53717	672	1251	707.6	66.6		35.6	0.56563	1.5901	1.6103	0.36797	0.59408	1.2221	0.3529	0.25078
2	Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>14</sub>	0.55891	655.1	1172.1	732.5	9.8		77.4	0.62495	1.6771	2.4831	0.40089	0.69098	1.4168	0.41181	0.17728
3	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>15</sub> Cu <sub>5</sub>	0.52646	473.6	899.6	514.2	34.5		67.6	0.6016	1.6692	1.9954	0.39412	0.67675	1.2704	0.39853	0.18532
4	Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	0.68458	586	856	660	0.1	72	74	0.77103	1.8109	10.068	0.4577	0.85748	2.4444	0.50923	0.07512
5	Ti <sub>34</sub> Zr <sub>11</sub> Cu <sub>47</sub> Ni <sub>8</sub>	0.59733	698.4	1169.2	727.2	100	4.5	28.8	0.62196	1.6386	2.5996	0.38938	0.6466	1.5446	0.37862	0.21248
6	Pd <sub>82</sub> Si <sub>18</sub>	0.60504	648	1071	648	1800		0	0.60504	1.605	2.3468	0.37696	0.60504	1.5319	0	0.24607
7	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>7.5</sub> Ni <sub>7.5</sub> Zn <sub>5</sub> Ag <sub>5</sub> Y <sub>10</sub>	0.59414	426	717	464	50	9	38	0.64714	1.6833	3.0881	0.40595	0.70014	1.5945	0.42053	0.1727
8	Ni <sub>59</sub> Zr <sub>16</sub> Ti <sub>13</sub> Si <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> Nb <sub>7</sub>	0.6495	845	1301	885	40		40	0.68025	1.6968	4.3213	0.4124	0.71099	1.9408	0.41989	0.16729
9	Pd <sub>42.5</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>7.5</sub> P <sub>20</sub>	0.68825	574	834	660	0.067		86	0.79137	1.8381	12.513	0.46875	0.89488	2.5385	0.52463	0.05436
10	Mg <sub>70</sub> Ni <sub>15</sub> Nd <sub>15</sub>	0.55332	467	844	489	178.2	1.5	22	0.57938	1.6004	1.812	0.373	0.60545	1.2971	0.35746	0.24258
11	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>25</sub> Y <sub>10</sub>	0.54342	413	760	473	50	4	60	0.62237	1.6887	2.3716	0.40324	0.70132	1.3631	0.41241	0.16897
12	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>20</sub>	0.52179	491	941	555	67.5	3	64	0.5898	1.6521	1.8289	0.38757	0.65781	1.2333	0.3899	0.19893
13	La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Cu <sub>20</sub>	0.54036	395	731	449	72.3	3	54	0.61423	1.6771	2.2302	0.39876	0.6881	1.3363	0.40654	0.17813
14	Ni <sub>60</sub> Nb <sub>40</sub>	0.62871	933	1484	933	1400	1	0	0.62871	1.6287	2.8672	0.38602	0.62871	1.6933	0	0.22797
15	Ca <sub>65</sub> Mg <sub>15</sub> Zn <sub>20</sub>	0.59524	375	630	410	20	6	35	0.65079	1.6886	3.1767	0.40796	0.70635	1.6078	0.42404	0.16837
16	Cu <sub>46</sub> Zr <sub>47</sub> Al <sub>7</sub>	0.60619	705	1163	781		3	76	0.67154	1.714	3.7732	0.41809	0.73689	1.7052	0.44083	0.14787
17	Cu <sub>60</sub> Zr <sub>30</sub> Ti <sub>10</sub>	0.61946	713	1151	750		4	37	0.65161	1.6714	3.3255	0.40236	0.68375	1.7123	0.40577	0.18565
18	Cu <sub>55</sub> Zr <sub>42.5</sub> Ga <sub>2.5</sub>	0.59133	709	1199	762		1	53	0.63553	1.6661	2.829	0.39937	0.67973	1.5551	0.40809	0.18725
19	Cu <sub>60</sub> Hf <sub>17.5</sub> Ti <sub>22.5</sub>	0.59561	732	1229	755		3	23	0.61432	1.627	2.4598	0.38501	0.63303	1.5191	0.36313	0.22298
20	Ca <sub>66.4</sub> Al <sub>33.6</sub>	0.60481	528	873	540		1	12	0.61856	1.6275	2.5712	0.38544	0.6323	1.5652	0.35205	0.22403
21	Ca <sub>60</sub> Al <sub>30</sub> Ag <sub>10</sub>	0.55645	483	868	531		2	48	0.61175	1.6558	2.2583	0.39304	0.66705	1.3792	0.39998	0.19458
22	Ca <sub>63</sub> Al <sub>32</sub> Cu <sub>5</sub>	0.61613	512	831	523		2	11	0.62936	1.6376	2.8227	0.38943	0.6426	1.6395	0.35576	0.21649
23	Ca <sub>40</sub> Mg <sub>25</sub> Cu <sub>35</sub>	0.58676	399	680	436		4	37	0.64118	1.6795	2.922	0.40408	0.69559	1.5516	0.41762	0.17556
24	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>5</sub> Pd <sub>5</sub> Gd <sub>10</sub>	0.57487	430	748	472		10	42	0.63102	1.6725	2.6644	0.40068	0.68717	1.4843	0.4122	0.18096
25	Mg <sub>65</sub> Cu <sub>15</sub> Ag <sub>10</sub> Y <sub>2</sub> Gd <sub>8</sub>	0.61493	420	683	464		9	44	0.67936	1.7197	4.0633	0.42067	0.74378	1.7643	0.44537	0.14361
26	Pd <sub>79.5</sub> Cu <sub>4</sub> Si <sub>16.5</sub>	0.58471	635	1086	678	500	0.75	43	0.62431	1.6524	2.5863	0.39396	0.6639	1.5033	0.39786	0.19864
27	La <sub>62</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>12</sub> Al <sub>14</sub>	0.56855	423	744	452		12	29	0.60753	1.6371	2.2424	0.38732	0.64651	1.4081	0.38755	0.21091
28	Pd <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> P <sub>20</sub>	0.59536	590	991	671	0.167	25	81	0.67709	1.7326	3.8661	0.42441	0.75883	1.6733	0.44819	0.13292
29	Mg <sub>90</sub> Ni <sub>10</sub> Nd <sub>10</sub>	0.51708	454	878	471	1251.4	0.6	17	0.53645	1.5545	1.2909	0.3536	0.5581	1.1108	0.32326	0.28222
30	Mg <sub>75</sub> Ni <sub>15</sub> Nd <sub>10</sub>	0.56962	450	790	470	46.1	2.8	20	0.59494	1.6141	2.0654	0.37903	0.62025	1.3824	0.36494	0.23164

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Теоретические основы понятия «Стеклообразующая способность расплава».....	5
1.1. Основные сведения о металлических стеклах .....	5
1.2. Критическая скорость охлаждения расплава .....	9
1.3. Приведенные температуры .....	12
1.4. Физико-химические факторы стеклообразования.....	14
1.5. Методы получения аморфных металлических сплавов	15
1.6. Критерии Иноуэ.....	18
Глава 2. Учебно-методические материалы по теме «Стеклообразующая способность расплавов».....	22
2.1. Пояснительная записка .....	22
2.2. Задачи для практических занятий .....	24
Блок №1 .....	24
Блок №2 .....	26
Блок №3 .....	31
2.4. Рекомендации по использованию учебно-методических материалов.....	32
Приложение 1 .....	34
Приложение 2 .....	35
Приложение 3 .....	38



Учебное издание

**МАКАРОВ Андрей Сергеевич,  
МАНАКОВА Евгения Олеговна,  
КОНЧАКОВ Роман Анатольевич,  
АФОНИН Геннадий Витальевич,  
ХОНИК Виталий Александрович**

# **СТЕКЛООБРАЗУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСПЛАВОВ**

*Учебно-методическое пособие  
по дисциплине «Физика некристаллических тел» для студентов  
бакалавриата физико-математического факультета, обучающихся  
по направлению подготовки 44.03.05 Педагогическое образование  
(с двумя профилями подготовки), профили: «Естествознание», «Физика»*

В авторской редакции

Изготовление оригинала-макета: *О.В. Бурдакина*

Подписано в печать 27.04.2021. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,33.  
Заказ 62. Тираж 30 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Воронежский государственный педагогический университет».

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре ВГПУ.

394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 86. Тел. (473) 2-55-58-32, 2-55-61-83