



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**«МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Кафедра «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИЛОВЕДЕНИЯ»**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ:**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

**ВВЕДЕНИЕ**

**И.И. Чернов**

**МОСКВА-2016 г.**

## ВВЕДЕНИЕ

Любой технический сплав должен обладать определенными механическими свойствами.

При синтезе конструкционных сплавов это требование главное и часто единственное. Поэтому приходится решать задачу о соотношении

прочности, пластичности и стоимости.

Все чаще ставится вопрос о создании сплавов *минимальной стоимости* при заданных *прочности* и *пластичности*.

К сожалению, методика расчета необходимой для данной конструкции пластичности отсутствует.

Приходится опираться на накопленный опыт и интуицию.

## ВВЕДЕНИЕ

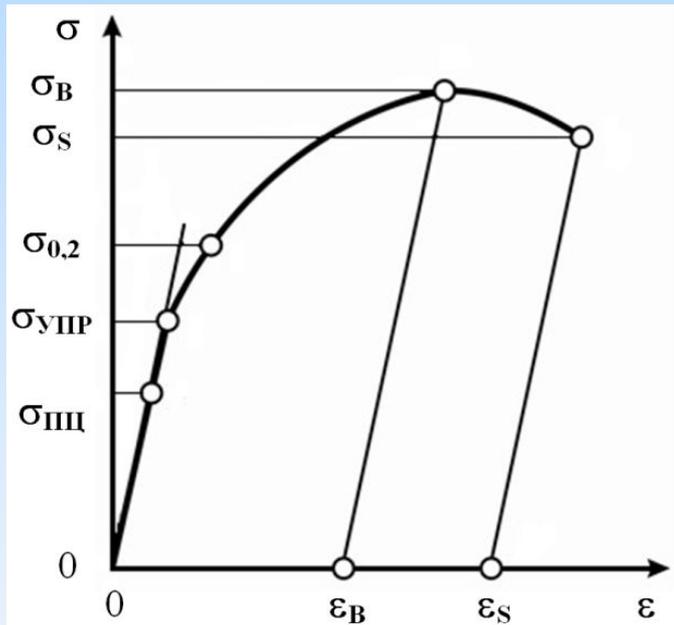
Упрочнение сплавов за счет регулирования состава может осуществляться:

- растворением легирующих элементов в основе;
- ограничением содержания вредных примесей;
- образованием дисперсной фазы из легирующих элементов путем термической обработки;
- модифицированием.

*Рассмотрим их последовательно*

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Растворенные атомы могут изменить параметры кристаллической структуры основы. Легирование *всегда повышает прочностные характеристики*:



- твердость  $H_V$ ;
- временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$  (предел прочности);
- предел текучести  $\sigma_{0,2}$ ;

Диаграмма растяжения  
«деформация-напряжение»

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Растворенные атомы могут изменить параметры кристаллической структуры основы. Легирование *всегда повышает прочностные характеристики*:

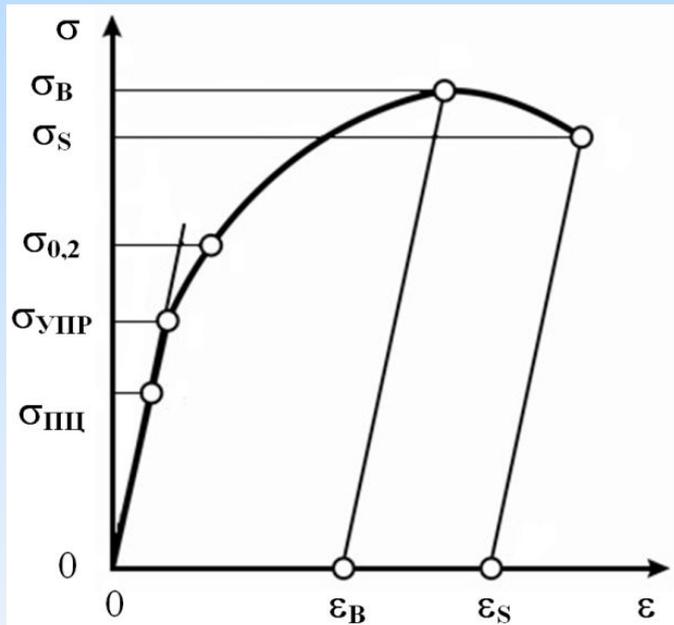


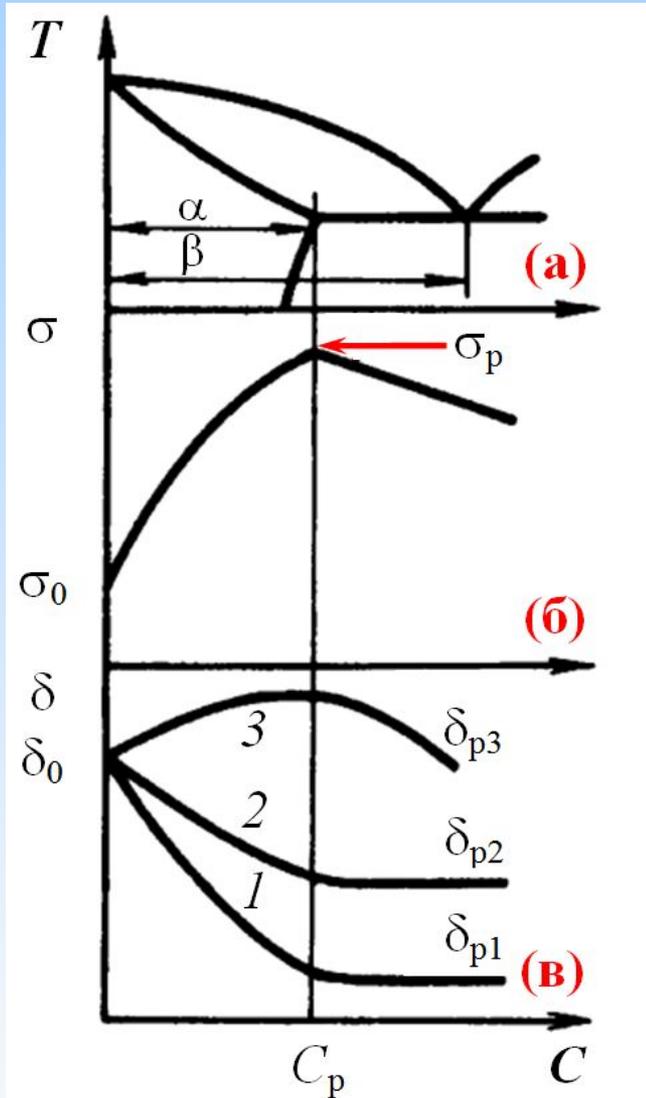
Диаграмма растяжения  
«деформация-напряжение»

□ предел упругости  $\sigma_{\text{УПР}}$   
(напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно **0,05 %**, иногда меньше – вплоть до **0,005 %**);

□ предел пропорциональности  $\sigma_{\text{ПЦ}}$  (напряжение, которое материал выдерживает без отклонения от закона Гука

$$\sigma = E\varepsilon$$

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



Коэффициент  
распределения добавки в  
основе:

$$k_r = \alpha/\beta \quad (\alpha \text{ и } \beta \text{ в ат. \%})$$

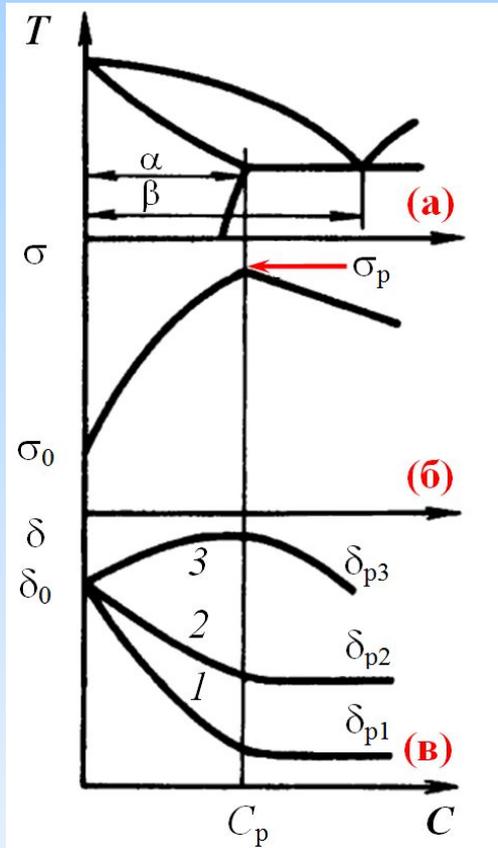
Влияние состава на  
диаграмму состояния (а),  
прочность (б)

и пластичность (в):

$$1 - k_r \rightarrow 0; \quad 2 - k_r = 0,01 \div 0,1;$$

$$3 - k_r \rightarrow 1$$

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



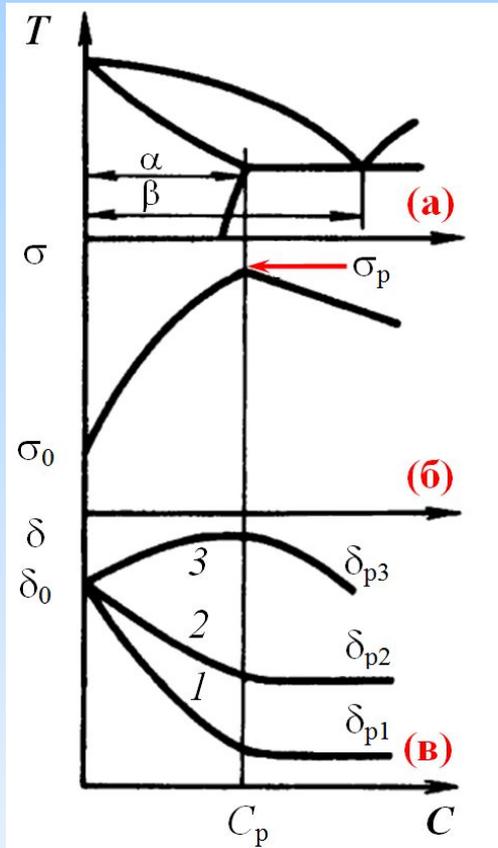
Влияние состава на диаграмму состояния (а), прочность (б) и пластичность (в):

$1 - k_r \rightarrow 0$ ;  $2 - k_r = 0,01 \div 0,1$ ;  $3 - k_r \rightarrow 1$

Зависимость прочности от концентрации растворимой добавки носит **нелинейный характер**:

- в случае непрерывных растворов она имеет форму ***параболы*** с максимумом примерно на середине ДСС (**концентрации элементов в ат. % !**);
- в области эвтектики зависимость ***линейная***; при этом направление изменения прочности зависит **от свойств второго компонента**: оно может быть и **нисходящим** и **восходящим**;

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



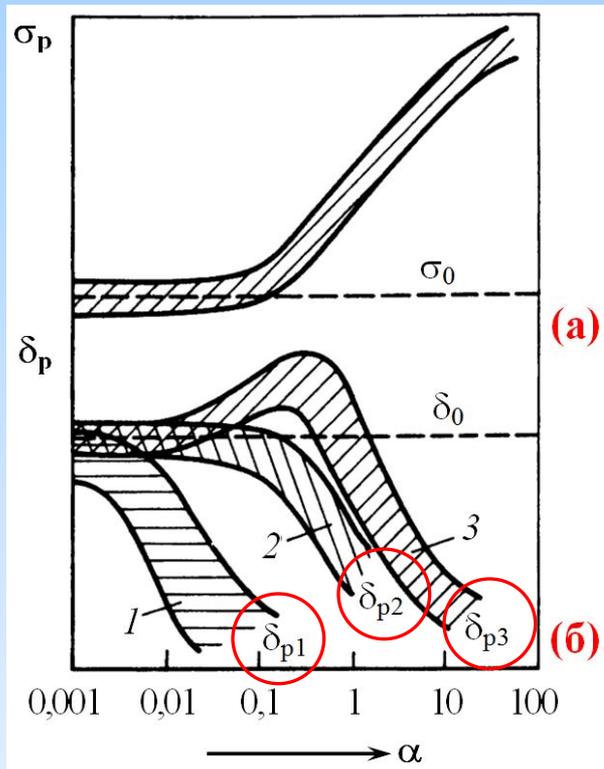
Влияние состава на диаграмму состояния (а), прочность (б) и пластичность (в):

$1 - k_r \rightarrow 0$ ;  $2 - k_r = 0,01 \div 0,1$ ;  $3 - k_r \rightarrow 1$

Зависимость прочности от концентрации растворяемой добавки носит **нелинейный характер**:

- в ограниченных растворах переход от криволинейной ветви, соответствующей раствору, к прямолинейной, соответствующей эвтектике, происходит **на пределе растворимости**;
- при небольших растворимостях добавки ее влияние на прочность сплава приближается к линейной.

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



Более сложной является зависимость **пластичности** от **концентрации** добавки:

□ в подавляющем большинстве случаев при увеличении концентрации добавки пластичность резко падает ( $\delta_{p1}$ );

□ в других случаях это падение менее резко ( $\delta_{p2}$ );

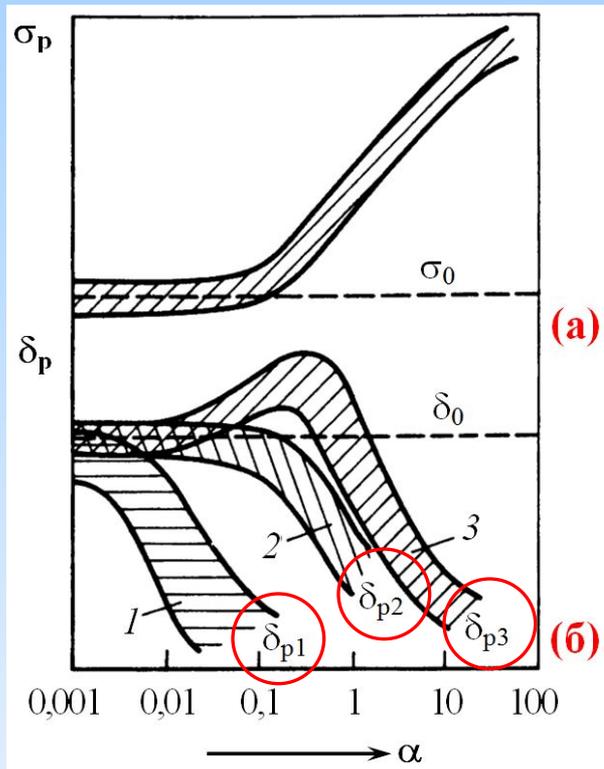
□ редко, но иногда пластичность даже увеличивается ( $\delta_{p3}$ ).

Зависимость прочности (а) и пластичности (б) на пределе

растворимости от критериев диаграмм состояния:

1 -  $k_r \rightarrow 0$ ; 2 -  $k_r = 0,01 \div 0,1$ ; 3 -  $k_r \rightarrow 1$

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



В изменении прочности решающую роль играет не природа элемента, а величина его предельной растворимости (в ат. %).

На кривой изменения прочности в зависимости от предельной растворимости видно:

□ при увеличении растворимости  $\alpha$  все элементы данной метасистемы повышают прочность сплава на пределе растворимости  $\sigma_p$ ;

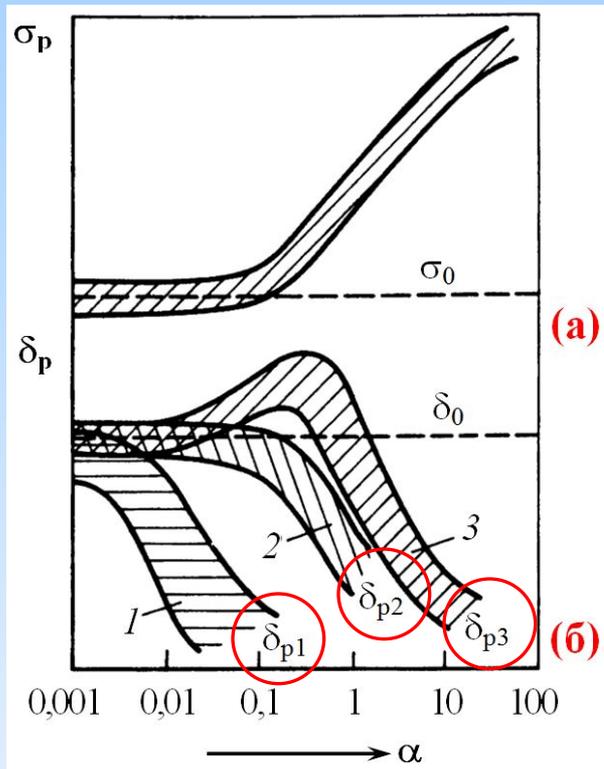
□ при малых  $\alpha < 0,01$  ат. % прочность на пределе растворимости не отличается от прочности основы;

Зависимость прочности (а) и пластичности (б) на пределе

растворимости от критериев диаграмм состояния:

1 -  $k_r \rightarrow 0$ ; 2 -  $k_r = 0,01 \div 0,1$ ; 3 -  $k_r \rightarrow 1$

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



В изменении прочности решающую роль играет не природа элемента, а величина его предельной растворимости (в ат. %).

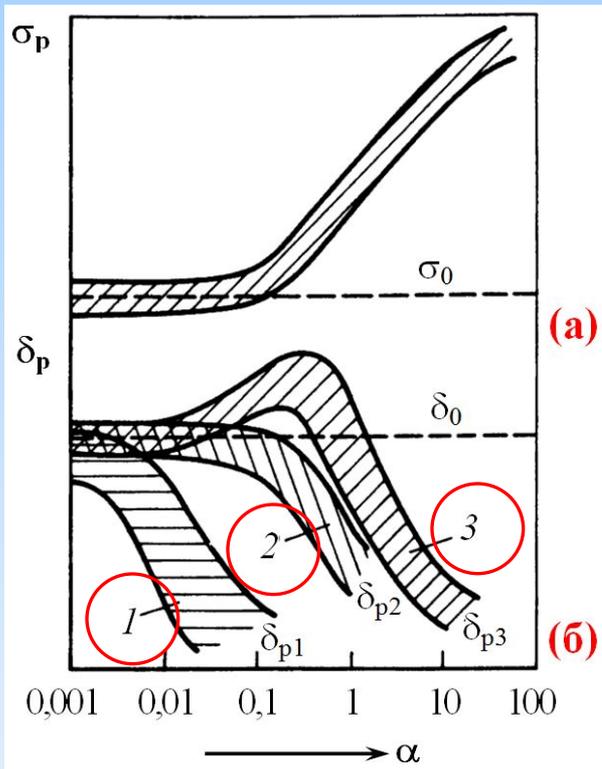
На кривой изменения прочности в зависимости от предельной растворимости видно:

- при увеличении растворимости  $\alpha > 0,1$  ат. % прочность на пределе растворимости прогрессивно растет;
- при  $\alpha = 50$  ат. % прочность достигает максимума;
- при  $\alpha > 50$  ат. % основой сплава становится добавка.

Зависимость прочности (а) и пластичности (б) на пределе растворимости от критериев диаграмм состояния:

1 -  $k_r \rightarrow 0$ ; 2 -  $k_r = 0,01 \div 0,1$ ; 3 -  $k_r \rightarrow 1$

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



Пластичность зависит от 2-х критериев:

- предельной растворимости  $\alpha$ ,
- критерия распределения  $k_r = \alpha/\beta$  ( $\alpha$  и  $\beta$  в ат. %).

□ При  $k_r \rightarrow 0$  добавка при кристаллизации концентрируется по границам зерен.

□ При  $k_r \rightarrow 1$  равномерно в теле зерна.

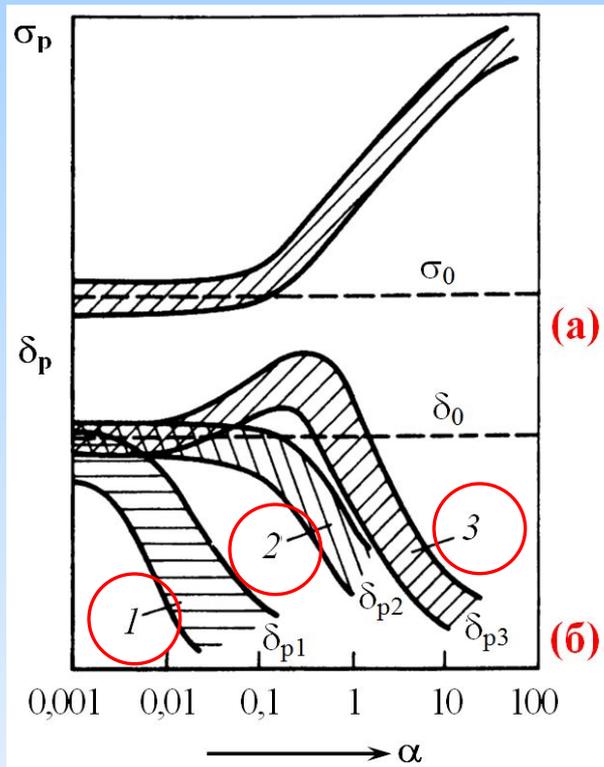
□ При  $k_r > 1$  концентрация добавки в центре зерна увеличивается, а на его границах падает.

Зависимость прочности (а) и пластичности (б) на пределе

растворимости от критериев диаграмм состояния:

1 -  $k_r \rightarrow 0$ ; 2 -  $k_r = 0,01 \div 0,1$ ; 3 -  $k_r \rightarrow 1$

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



Пластичность зависит от 2-х критериев:

- предельной растворимости  $\alpha$ ,
- критерия распределения  $k_r = \alpha/\beta$  ( $\alpha$  и  $\beta$  в ат. %).

При  $k_r < 0,01$  элемент является вредной примесью. Такие элементы обладают малой растворимостью, резко снижают пластичность, а при повышенных концентрациях снижают и прочность (**область 1**).

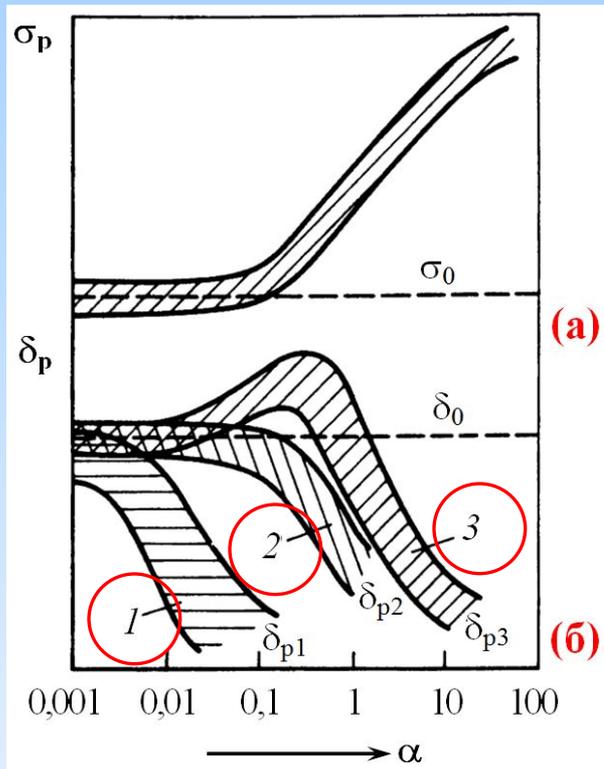
□ При  $k_r > 0,1$  пластичность сохраняет значение, близкое к пластичности основы.

□ При дальнейшем росте  $\alpha$  пластичность начинает снижаться (**область 2**).

Зависимость прочности (а) и пластичности (б) на пределе растворимости от критериев диаграмм состояния:

1 -  $k_r \rightarrow 0$ ; 2 -  $k_r = 0,01 \div 0,1$ ; 3 -  $k_r \rightarrow 1$

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСТВОРЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В ОСНОВЕ СПЛАВА И ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ



Пластичность зависит от 2-х критериев:

- предельной растворимости  $\alpha$ ,
- критерия распределения  $k_r = \alpha/\beta$  ( $\alpha$  и  $\beta$  в ат. %).

## □ Самый интересный случай

сочетание высокого  $k_r$  (близкого и даже больше 1) с небольшой  $\alpha$ , когда пластичность снова возрастает. **К сожалению, такая комбинация встречается редко.**

- Дальнейшее увеличение  $\alpha$  даже при высоком  $k_r$  снижает пластичность (область 3).

Зависимость прочности (а) и пластичности (б) на пределе растворимости от критериев диаграмм состояния:

1 -  $k_r \rightarrow 0$ ; 2 -  $k_r = 0,01 \div 0,1$ ; 3 -  $k_r \rightarrow 1$

# КЛАСИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЛАВАХ

В зависимости от величин критериев  $\alpha$  и  $k_r$  химические элементы удобно разбить на 4 разряда.

**Первый разряд. Основные легирующие элементы:**

$$\alpha \geq 1, k_r \geq k_{r\text{кр}} \text{ (ниже элементы – вредные примеси).}$$

Эти элементы главные упрочнители и их можно вводить в единственном числе.

**Второй разряд. Вспомогательные легирующие элементы:**

$$\alpha = 0,01-1, k_r \geq k_{r\text{кр}}$$

Это элементы, повышающие пластичность (пластификаторы, модификаторы).

# КЛАСИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЛАВАХ

В зависимости от величин критериев  $\alpha$  и  $k_r$  химические элементы удобно разбить на 4 разряда.

**Третий разряд. Вредные примеси:**

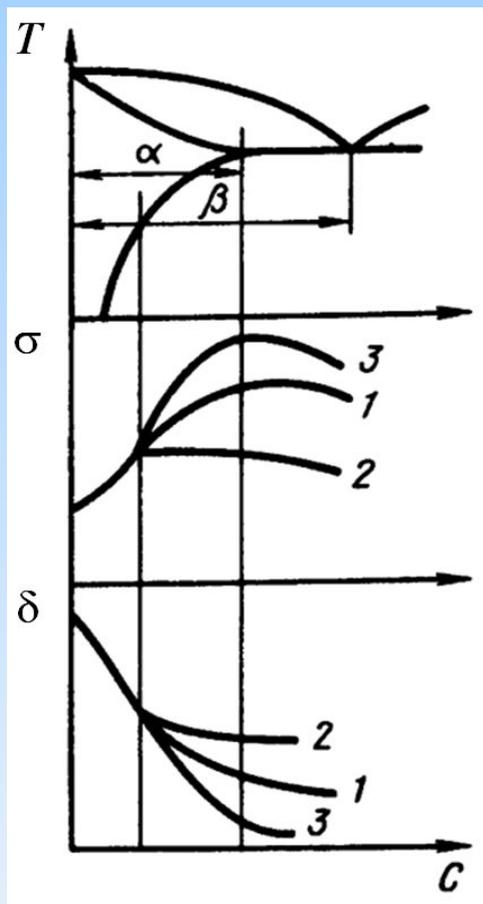
$$k_r < k_{r\text{кр}}, \alpha \text{ любая, но не слишком малая}$$

**Четвертый разряд. Малорастворимые примеси:**

$$\alpha < 0,01$$

При такой малой  $\alpha$  коэффициент распределения  $k_r$  не имеет большого значения. Реального влияния на механические свойства эти примеси не оказывают.

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ПУТЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

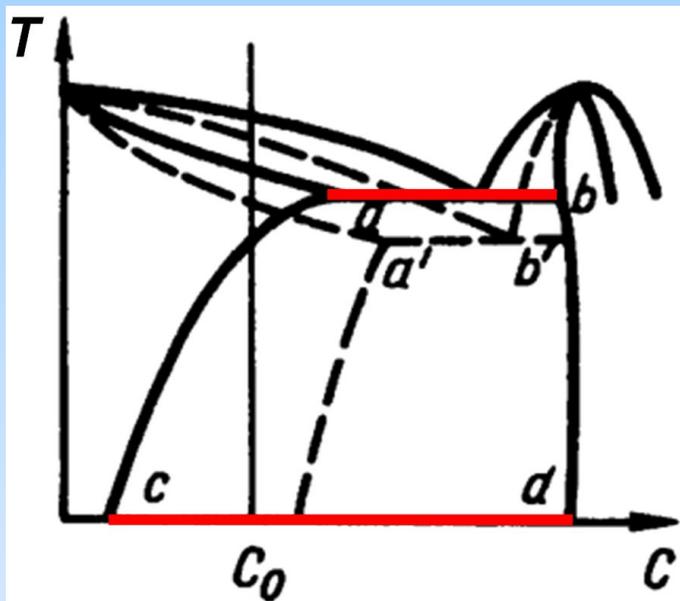


Влияние термической обработки на прочность и пластичность сплавов:

1 — закалка, 2 — отжиг,  
3 — закалка + старение

Дисперсная фаза, выпадающая из пересыщенного твердого раствора при старении (3), повышает прочность и снижает пластичность по сравнению с режимами (1) и (2).

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ПУТЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ



Определение критерия термической обработки при закалке. Штриховой линией показана деформация ДСС при закалке

## Эффективность

термической обработки в случае **закалка + старение** выражается **критерием термической обработки**

$$\gamma = ab/cd.$$

Штриховой линией показана схема деформации ДСС при закалке.

Для сплава состава  $C_0$  при закалке высокотемпературное состояние фиксируется при нормальной температуре.

# ВОЗДЕЙСТВИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

**Модифицирование** – введение в сплав небольших добавок (0,01–0,1 %) веществ, воздействующих на размеры и формы структурных составляющих, а через них на свойства сплава, следовательно, это можно считать **разновидностью легирования**.

По механизму воздействия на процесс кристаллизации различают два вида модифицирования:

- **инокуляция** – образование искусственных центров кристаллизации и барьеров на поверхности растущих кристаллов, при этом округляется их форма, замедляется рост и становятся меньше размеры;
- **лимитация** вызывает округление структурных составляющих, т.е. можно говорить о введении сфероидизаторов.

# ВОЗДЕЙСТВИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

Для того, чтобы *инокуляция* была возможна, вводимые добавки должны иметь более высокую температуру плавления, чем сплав, и они должны быть устойчивы в жидких металлах.

Например:

- устойчивы в жидком Al (1000 °C)  
TiC (3257 °C), ZrC (3530 °C), TiB<sub>2</sub> (2790 °C), ZrB<sub>2</sub> (3200 °C);
- устойчивы в жидком Fe (стали) (1600 °C)  
TiC (3257 °C), ZrB<sub>2</sub> (3200 °C), TiN (2950 °C), TiB<sub>2</sub> (2790 °C).

# ВОЗДЕЙСТВИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

Для того, чтобы *лимитация* была возможна, вводимые добавки должны следующими особенностями:

- достаточно малым  $k_r$  в фазе, подлежащей модифицированию;
- должна быть пониженной и лежащей в определенных пределах растворимость  $\beta$  в жидкой фазе основы сплава, т.к. слишком малый критерий  $\beta$  не даст возможности ввести элемент в сплав, а слишком высокая  $\beta$  не даст возможности создать устойчивый барьер.

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 1. МОНОЛЕГИРОВАННЫЕ СПЛАВЫ

*Монолегированными сплавами* называют такие, которые содержат кроме основы только один легирующий элемент и технологические примеси.

Это должен быть самый эффективный элемент из ряда легирующих добавок.

Пример:

простые силумины (Al-Si), двойные латуни (Cu-Zn), двойные бронзы (Cu-Sn), углеродистые стали (Fe-C + примеси Mn, Si) и т.п.

**Но:** современные тенденции развития таковы, что монолегированные сплавы используются все в меньших масштабах.

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 2. ЛЕГИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

*Комплексным легированием* называют одновременное введение в сплав нескольких легирующих элементов, т.е. это легирующий комплекс.

Целесообразность и необходимость комплексного легирования определяется:

**1.** Требованием одновременного обеспечения необходимого уровня нескольких свойств. Некоторые элементы, повышая одно свойство, снижают другие, уровень которых тоже должен быть обеспечен. Это *требует решения компромиссных задач*.

Пример:

а) обеспечение максимальной прочности конструкционного сплава при заданном уровне пластичности, вязкости и ограничения стоимости легирующих элементов;

б) повышение прочности проводникового сплава при минимальном, заданном значении электропроводности.

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 2. ЛЕГИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

Целесообразность и необходимость комплексного легирования определяется:

**2.** Необходимостью снижения отрицательных влияний на свойства сплава вредных примесей, которые трудно удалить металлургическими средствами.

Часто действенным способом подавления их влияния является введение добавок, образующие устойчивые тугоплавкие соединения с вредными примесями.

Пример: в стали для

- а) связывания кислорода (раскисления) вводят Si, Mn, Al;
- б) связывания серы вводят Mn, РЗМ.

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 2. ЛЕГИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

Целесообразность и необходимость комплексного легирования определяется:

3. Снижением отрицательных эффектов от введения некоторых весьма необходимых добавок.

Пример:

В стали добавляют не менее 13 мас.% Cr, чтобы она была коррозионно-стойкой.

Но при этом из-за формирования по границам зерен высокохромистых соединений (карбида  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\sigma$ -фазы FeCr и др.) развивается межкристаллитная коррозия (МКК).

Добавки Ti, Nb связывают углерод в устойчивые карбиды типа MC, предотвращая МКК.

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 2. ЛЕГИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

Целесообразность и необходимость комплексного легирования определяется:

3. Изменением свойств сплава благодаря взаимодействию между собой и основой двух или более легирующих элементов.

*Этот вид комплексного легирования наиболее интересен.*

Рассмотрим его на примере анализа математической модели сплава:

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 2. ЛЕГИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

Пусть свойство сплава  $\sigma$  связано с концентрациями двух легирующих элементов  $x_1$  и  $x_2$  полиномом:

$$\sigma = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2,$$

где:

$b_0$  – свойство основы сплава при  $x_1$  и  $x_2 = 0$  ( $b_0 = \sigma$ );

$b_1$  и  $b_2$  – коэффициенты единичного влияния элементов  $x_1$  и  $x_2$  на свойство сплава;

$b_3$  – коэффициент совместного влияния добавок на свойство сплава.

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 2. ЛЕГИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

$$\sigma = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2$$

Возможны несколько случаев воздействия добавок на свойства сплава:

- 1.**  $b_1, b_2, b_3 = 0$ . Добавки не влияют на свойство сплава. Их введение нецелесообразно.
- 2.**  $b_3 = 0$ ;  $b_1$  и  $b_2 > 0$ . Каждый из 2-х элементов воздействует на свойство пропорционально своей концентрации независимо (аддитивно) друг от друга. Целесообразно вводить только одну добавку, обладающую большой эффективностью или дешевизной.

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 2. ЛЕГИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

$$\sigma = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2$$

Возможны несколько случаев воздействия добавок на свойства сплава:

**3.**  $b_3 < 0$ ;  $b_1$  и  $b_2 > 0$ . Одновременное введение 2-х добавок взаимно ослабляют друг друга. Их не следует вводить совместно.

**4.**  $b_1 \gg b_2 > b_3$ . Одна из добавок действует значительно сильнее, чем другая. Совместный эффект их действия мал. Добавку  $x_2$  вводить нецелесообразно.

# ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВОВ

## 2. ЛЕГИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

$$\sigma = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2$$

Возможны несколько случаев воздействия добавок на свойства сплава:

**5.**  $b_1$  или  $b_2 < 0$ ;  $b_3 < b_1$  и  $b_2$ . Добавку, имеющую отрицательный коэффициент, явно нецелесообразно вводить.

**6.**  $b_3 \gg b_1$  и  $b_2$ . *Наиболее интересный случай.* Эффект от совместного влияния больше, чем сумма эффектов от введения каждой добавки по отдельности. Это *эффект синергизма* – добавки взаимно усиливают свое воздействие.

# ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР СОСТАВА СПЛАВА

После выбора легирующего комплекса и на основе ДСС установления допустимых пределов варьирования концентраций входящих элементов, необходимо определить окончательный оптимальный состав сплава.

Это проводят методами планирования эксперимента, включающими в себя:

- составление программы эксперимента,
- построение математической модели сплава,
- подтверждение ее адекватности,
- интерпретацию модели,
- определение оптимального состава,
- выбор допусков на химический состав.

После этого проводят производственную проверку сплава и следование работоспособности получаемых из него изделий путем опытной эксплуатации в натуре или на опытных стендах.

*Другого пути, кроме прямых опытов для окончательного определения состава сплава, пока нет!*

**Спасибо за внимание!**