

## **ТРИЗ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ: ОТКРЫВАЕМ НОВУЮ ТЕОРИЮ ХЛАДНОЛОМКОСТИ**

**Горобченко С.Л., к.т.н., сертифицированный специалист ТРИЗ, ВШТЭ  
СПбГУПТД, Санкт-Петербург**

**Ковалёв Д.А., к.т.н., ВШТЭ СПбГУПТД, Санкт-Петербург**

**[valvepromconsult@bk.ru](mailto:valvepromconsult@bk.ru)**

### **Аннотация**

*Применение ТРИЗ в материаловедении может создать новые возможности для развития научных теорий, если подойти к этому вопросу системно. В работе демонстрируется, как инструменты ТРИЗ могут быть применены к развитию новых теорий в материаловедении и изучению явления хладноломкости.*

### **ТРИЗ для решения научных задач**

Любое явление, которое было открыто, уже наверняка имеет и какое-либо объяснение. Оно лежит в области имеющихся на тот момент методов и средств научного познания. Однако тут же рождаются и основные противоречия между имеющейся теорией, наблюдаемыми явлениями или потребностями техники.

Трудности в создании методики научной работы сравнительно с методикой изобретательства состоят в том, что здесь большую роль играют обстоятельства, усложняющие основной алгоритм работы с проблемой, принятой в ТРИЗ. Усложняющие обстоятельства есть и в изобретательском творчестве. Но в "открывательстве" они присутствуют в большей концентрации. Это уже не оговорки и не исключения из довольно универсальных правил, а постоянно действующие "искажающие факторы", которые приходится всегда учитывать.

В материаловедении, как и в большинстве устоявшихся наук, одним из самых сильных факторов является исторически сложившееся понимание методов и объяснительных механизмов. Если в изобретательстве мирно уживаются приемы, возникшие на разных этапах развития, то в науке есть точное понимание, что современно, а что отжило свой срок.

Кроме того, открытие новых явлений делается сравнительно нечасто, тогда как объяснять и находить закономерности в сочетании явлений приходится всегда. При этом объяснительные механизмы новых теорий создают прочную основу и для дальнейших прикладных исследований и применения в технике. Мы остановимся именно на этой части научных задач. К тому же при открытии закономерностей значительно больше требуется технология мышления, направленная на вскрытие противоречий и установление закономерностей, тогда как открытие явлений часто происходит просто случайно.

## Приемы открытия закономерностей

Известны два основных случая открытия закономерностей: либо закономерность устанавливается впервые, либо задача состоит в том, чтобы преодолеть трудности (объяснить противоречия, исключения), на которые натолкнулась предыдущая теория.

В первом случае, а исторически с него начинается развитие теории, простейший прием состоит в следующем: надо увеличивать количество известных и критичных фактов для старой теории до тех пор, пока закономерность не проявится сама собой. Это, кстати сказать, элементарный прием научного исследования и в наши дни. Во втором случае характерный прием заключается в том, что вводятся гипотетические явления, снимающие затруднения.

Обратим внимание, что второй прием снижает усилия по накоплению эмпирического материала многократно. Также обратим внимание, что основные ответы находятся в анализе существующей проблемы с микроуровня, или последующего уровня по отношению к решаемой проблеме. По сути, можно сказать, что проявляется разрешение физического противоречия на микроуровне по сравнению с техническим противоречием. Например, для хладноломкости это более чем, очевидно: катастрофическое разрушение конструкций заметно на техническом уровне, тогда как объяснительные механизмы на физическом уровне пока не ясны.

Объяснительные механизмы, взятые из дальше всех "продвинувшихся" теорий, или снабженные новыми научными методами и средствами, могут стать новым приемом для "отстающих" теорий. В частности, идеи химии могут в значительной степени помочь решению задачи хладноломкости.

Также важно учитывать и психологический момент: Вы столкнетесь с тем, что Вас не поймут те, кто придерживается старой теории, или Вам придется объяснять "еретические" факты, не меняя при этом старой теории.

Обычно накопление данных все более показывает "дыры" и "трещины" в старой теории. Это означает, что теория переходит в период зрелости. В этот период надо концентрировать усилия не только на приложении ее к объяснению новых групп явлений, но и на изучении слабых мест. Проще говоря: надо развивать теорию не там, где она сильна, а там, где ощущается ее слабость. Короче, ищите "трещины" в теории. Тогда это будет действительно уровень изобретательства в науке.

Можно обоснованно утверждать, что средние темпы развития науки могли бы быть заметно выше, если бы постоянно и планомерно велась работа по отысканию трещин в "благополучных" еще сегодня теориях. Или говоря по-другому: надо изучать не законы, а исключения из них: именно там и прячутся новые открытия.

Перенос методов и аппарата одной области в другую можно считать приемом достаточно высокого уровня при анализе закономерностей. Общим примером является математика. Однако, методы кибернетики, статистики, анализа больших баз данных по-прежнему являются передним краем таких

переносов. За ними могут последовать и гуманитарные методы или даже методы музыкальные.

К методам переноса примыкает и провозглашение известного, но считающегося ограниченным явления, в качестве универсального закона. Правда, это действует, если "пойман" действительно универсальный закон.

Из других приемов отметим обращение: новая закономерность устанавливается путем ограничения считавшегося ранее универсальным принципа и возвращение к старым теориям на новой основе, например, дается механическая трактовка явлений химии.

Одним из важных законов, который всегда оказывает влияние на развитие науки, по нашему мнению является закон перехода на микроуровень. Этот закон хорошо работает в материаловедении, поскольку каждое крупное открытие и переходы к более сильным теориям в основном были связаны с ним. В частности, группы теорий, которые работают на разных уровнях структур материалов, показаны на рис.1.

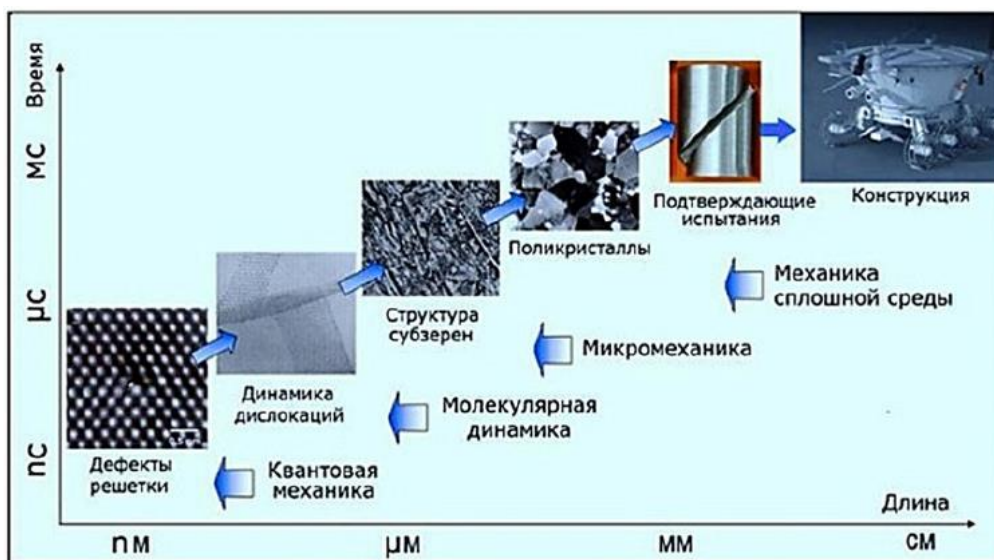


Рис. 1. Зоны действия основных физических теорий в материаловедении в зависимости от уровней рассмотрения структуры металлов

Такое разбиение и классификация зон приложения основных физических теорий позволит по-новому взглянуть и на возможное развитие теорий хладноломкости. Теперь приложим ТРИЗ к созданию новой теории хладноломкости.

### Обзор теорий хладноломкости

Основу нашего размышления о движении теоретического осмысления технологии составляет анализ основных элементов структуры материалов и основанного на этом теоретических подходов к пониманию хладноломкости, табл.1.

Табл. 1. Основные критерии понимания работы с материалом на основе иерархии структур

Размерность, м	$10^* 10^{-1} 10^{-2}$	$10^{-3} 10^{-4} 10^{-5}$	$10^{-6} 10^{-7}$	$10^{-8} 10^{-9} 10^{-10}$	$10^{-11} 10^{-12}$
Структурные уровни	Макроструктура	Микроструктура	Субструктура	Мезоструктура	Атомная структура
Средства изучения	Невооруженный глаз	Оптический микроскоп	Электронный микроскоп	Средства разрабатываются	Рентгеновское излучение, ускорители
Основные элементы уровней	Зерна первичной кристаллизации, макрокопические дефекты отливок	Зерна вторичной кристаллизации	Блоки, выделения, границы зерен	Фрагменты атомно-кристаллических решеток, дислокации и другие дефекты строения, кластеры	Ячейки атомно-кристаллической решетки, атомы, электронные оболочки атомов
Средства воздействия на структурные уровни	Скорость затвердевания, модифицирование, горячая обработка давлением, технологические мероприятия	Режимы термообработки при отпуске, легирование для каркасного упрочнения	Режимы закалки, легирование для образования выделений, холодная обработка давлением	Обработка в жидком состоянии, подготовка образования выделений промежуточных фаз	Растворное легирование для воздействия на электронные оболочки

Теоретическое осмысление явлений хладноломкости и создание теорий движется от анализа явления на макроуровне к более низким структурным слоям. К работам первого этапа можно отнести анализ температурного порога хладноломкости, анализ концентраторов напряжений, скорость приложения нагрузки, а также видимые невооруженным взглядом слои макроструктуры. Обобщение этих работ и их теоретическое закрепление было достигнуто в работах Иоффе-Давиденкова, рис. 2.

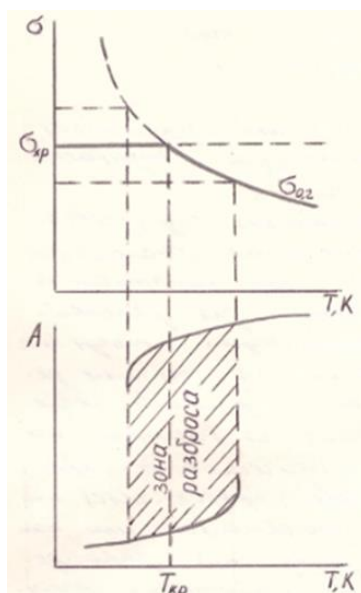


Рис. 2. Схема Иоффе-Давиденкова, объясняющая температурный порог хладноломкости.

$\sigma$  - прочность,  $\sigma_{xp}$  - предел хрупкости,  $\sigma_{0,2}$  - предел текучести,  $A$  - работа разрушения

Общие идеи содержали в основном понятия, пришедшие из анализа конструкций по моделям теории сопротивления материалов и их связи с температурой и изменением прочности при ее изменении (прочность, пластичность, дефекты и трещины). Много внимания уделялось схемам перехода от вязкого разрушения к хрупкому в результате стеснения пластической деформации, рис.3. Однако такой подход, к сожалению, не давал точного понимания физики явления.

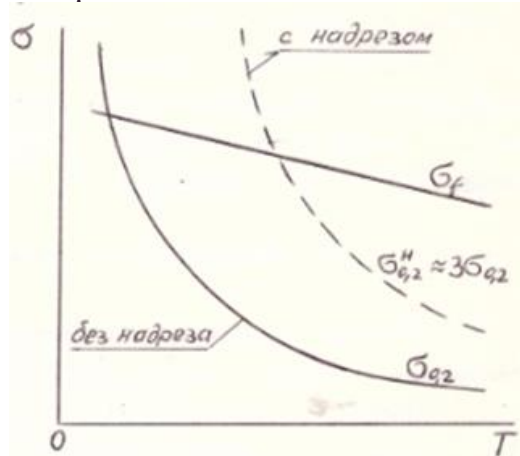


Рис. 3. Пример анализа хладноломкости материала с надрезом в связи со стеснением пластической деформации. Показан критерий охрупчивания материала надрезом по Людвику-Давиденкову-Орвану.

На уровне микроструктуры и субструктур основные поисковые направления касались анализа величины зерна, как первичного (литого), так и вторичного и структурных элементов микроструктуры, таких как субзерен, неметаллических включений, границ зерен и пр. Обобщение этих решений было достигнуто в схемах анализа изменения прочности зерен, анализа межзеренного и транскристаллитного разрушений и пр., рис.4.

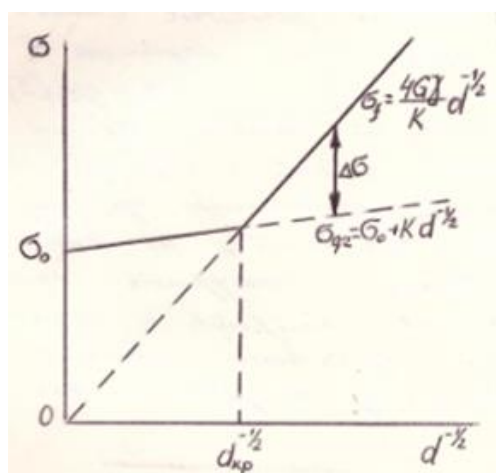


Рис. 4. Влияние диаметра зерна  $d$  на предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и разрушающее напряжение образцов из мягкой стали при 77К.

Обозначения по рис.:  $G$  - модуль сдвига,  $\gamma$  - эффективная поверхностная энергия;  $K$  - константа уравнения Холла-Петча  $\sigma_0$  - напряжение внутреннего трения решетки;  $d$  - диаметр зерна

На уровне мезоструктур впервые большое внимание было уделено анализу кристаллических решеток, анализу плоскостей скольжения, своеобразному механокристаллическому подходу, когда работа ГЦК решетки, ее лучшая хладостойкость оправдывалась только большим количеством плоскостей скольжения. Основная роль здесь в объяснении явлений хладноломкости принадлежала теории дислокаций и их зависимости от температуры.

Вопросы использования атомных структур, рабочих слоев, связанных с ячейками кристаллической решетки, атомов, электронных оболочек атомов, как правило, только частично попадали в поле зрения исследователей. Однако, именно здесь лежала большая часть интересных открытий и объяснительных механизмов, способных прояснить на самом глубоком физическом уровне явление хладноломкости, восполняющая недостатки теорий, основанных на исследовании других уровней.

По всей видимости, переход к объяснительным механизмам на более глубоких уровнях микроструктур, соответствующий движению по линиям закона перехода на микроуровень, должен составлять основное направление развития теории хладноломкости.

### **Новая теория связи хладноломкости с особенностями межатомной связи переходных металлов**

Хладноломкость установлена достаточно давно и постоянно себя проявляла в развитии техники, от лопания чугуна в морозы до гибели судов Либерти во время даже небольших штормов в Атлантике во время войны. Исследователи постоянно наталкивались на трудности, связанные с появлением хладноломкости и возникающего противоречия хрупкости или роста прочности против потери пластичности, тогда как практика требовала найти обратные решения. Традиционные объяснения, такие как объяснение с точки зрения потери возможности скольжения ГЦК-ОЦК решеток, или потери динамичности дислокаций, по сути, не дают понимания, почему происходит резкое падение пластичности.

Известно, что для большинства металлов высокая пластичность сопровождается низкой прочностью и, наоборот, высокая прочность сопровождается значительной хрупкостью. Существует и ряд металлов, обладающих хорошей пластичностью и прочностью. Но пока не найдено ни одного технически возможного к использованию металла, имеющего одновременно, и высокую прочность, и высокую пластичность. Даже среди металлов с хорошей прочностью и пластичностью наблюдается определенная дифференциация. Они либо имеют повышенную прочность при средней пластичности, либо среднюю прочность при хорошей пластичности.

В этом плане график  $T_{xp} \setminus T_{пл} = f(N_{эл})$ , приведенный в работе (1), обозначает, по сути, границу пластичности металла и реализации всей энергии кристалла через прочностные свойства. Механические свойства конкретного металла определяются через вклад каждой составляющей электронной связи в кристаллической решетке в межатомную связь.

Прочность и пластичность зависят от характера межатомной связи, распадающейся для различных металлов на металлическую, ионную и ковалентную. Поскольку при образовании металлической «молекулы» - кристаллической ячейки принимают участие все виды связи, то оценить силу взаимодействия и качественно предсказать механические свойства элементов можно через энергию связи  $E_{св}$ , рис.5.

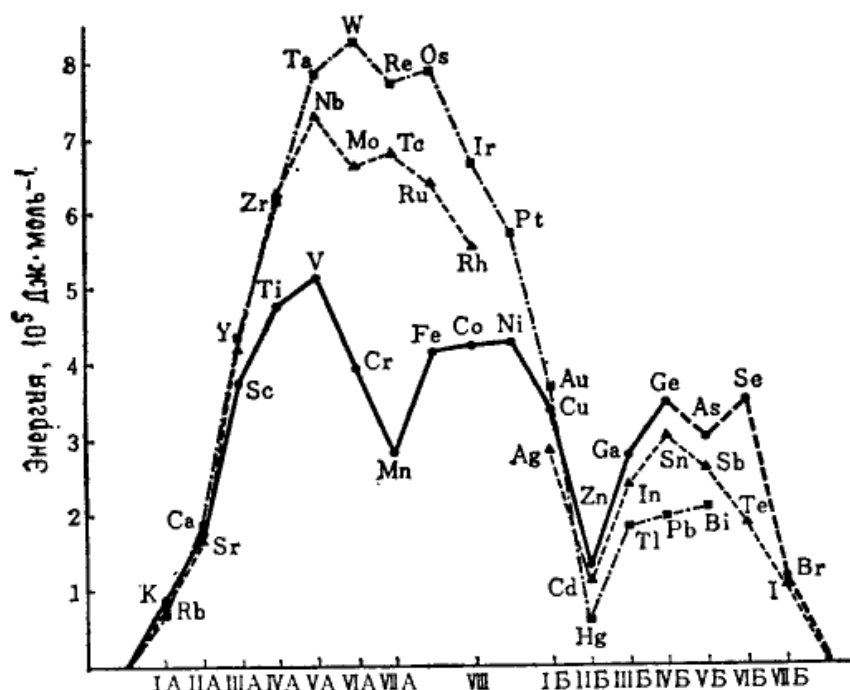


Рис. 5. Зависимость энергии металлической связи от положения элемента в Периодической таблице Менделеева Д.И., по (2)

● - четвертый период; ▲ - пятый период; ■ – шестой период

Экспериментально такой подход подтверждается высокой температурой плавления элементов с высокой энергией связи (W, Ta, Re и др.) Аналогично, низкотемпературный переход к хрупкости зависит от энергоемкости процесса. Элементы с высокой энергией связи имеют пониженную  $T_{xp}$ .

Хотя низкотемпературный переход к хрупкости зависит во многом от конфигурации электронов внешней электронной оболочки, но дополнительные связи между s и d; и p и s электронами могут в той или иной степени понижать температуру перехода к хрупкости.

Вклад энергии связи в прочность или пластичность определяется электронным строением атомов элемента. Некоторое несоответствие зависимости энергии связи от номера элемента и механических свойств (в

относительных единицах от температуры) объясняется тем, что даже при деформировании кристалла не вся энергия связи реализуется в виде механической энергии. Часть может проявиться в других видах энергии, таких как запасенная потенциальная энергия (в виде напряжений в металле) или перейти в тепловую и пр.

Достаточное объяснение изменению энергии связи в элементах дает Дж. С Гриффитс с поправкой Поллинга (2). Суть их подхода заключается в том, что атомы за счет своих валентностей образуют ковалентные связи с атомами в близлежащей координационной сфере и возможно исключительно быстрое обменное перераспределение таких связей между партнерами. Следует учитывать, что понижение температуры приводит к большей устойчивости ковалентных связей.

Когда в изолированных атомах совершенно не заполнены  $(n-1)d$  и  $nS$  орбитали, связь образуется за счет этих орбиталей. Если они заняты, то образование связи обусловлено  $nS$  и  $nP$  орбиталями. Для образования связи от каждого атома требуется один электрон, причем когда  $(n-1)d$  и  $nS$  орбитали в сумме дают 6 неспаренных электронов, число ковалентных связей достигает максимума. Поэтому возможно появление пика в области группы VIA, т.к. при увеличении числа электронов по сравнению с этим количеством число неспаренных электронов в  $d$ -оболочке будет уменьшаться за счет спаривания.

Полагается, что у элементов IIВ группы с конфигурацией  $(p-1)d^{10}$  и  $nS^2$  прочность будет ослаблена. У элементов IVВ группы структура элементарных веществ образована связями, для которых предполагается  $sP^3$  гибридизирующее состояние и их энергия достигает максимума. В целом, связи в IIВ-IVВ групп и структура элементарных веществ образована связями, для которых характерна  $sP^3$  гибридизация, выраженный ковалентный характер которой значительно повышает  $T_{хр}$ .

По мере возрастания главного квантового числа  $n$  разность энергий между уровнями  $(n-1)d$  и  $nS$  уменьшается, а между  $nS$  и  $nP$  увеличивается. Поэтому при движении сверху вниз конфигурации  $d^4S$  дают прочную связь, а конфигурации  $SP^4$  слабую связь, т.е. тенденции в изменении прочности прямо противоположны. Так, известно, что у непереходных металлов, имеющих  $SP^4$  слабую связь, с увеличением атомного номера связь становится более рыхлой, а  $T_{хр}$  повышается, а у переходных металлов усиливается ее металлический характер, а  $T_{хр}$  понижается. У переходных металлов модуль Юнга больше, чем у непереходных металлов, что связано с наличием более прочной связи (2).

Следует отметить, что для пластичного состояния характерно большее время нахождения электрона в коллективизированном состоянии, чем в связанном при обменной ковалентной связи. Для хрупкого состояния характерно, наоборот, то, что электрон находится большее время в связанном состоянии, в поле положительно заряженного основного иона, чем в коллективизированном состоянии.



Из зависимости  $T_{xp} \setminus T_{пл} = f(N_{эл})$  (1) следует, что для групп металлов уменьшение атомных радиусов приводит к понижению  $T_{xp}$  для части периода в целом. Так, пики 3d и 4f переходных металлов IVA-IVB групп значительно ниже, чем у непереходных металлов IA-IIIА групп. Это объясняется увеличением числа связывающих электронов, приходящихся на один атом. Сверху вниз по вертикали возрастают атомные радиусы и, соответственно, параметр решетки. Тем самым, хотя число электронов увеличивается, однако, изменение  $T_{xp}$  будет определяться наличием коллективизированных электронов из-за возрастающего заряда атомного ядра.

Большую роль играет и характер застройки оболочек. Так, у переходных металлов 5<sup>го</sup> и 6<sup>го</sup> периодов достраивается 4f оболочка, поэтому увеличение заряда ядра и связанные с ним эффекты оказываются более существенными, чем влияние увеличивающегося числа электронов (т.н. лантаноидное сжатие) (2).

### Переходные металлы, фазовые переходы и хладноломкость

Рассмотрим фазовые переходы и влияние различных легирующих элементов на хладноломкость. Для кристаллических решеток плотнейших структур характерна предельная сближенность атомов со своими соседями. Считается, что межатомные связи не локализованы на определенных атомах, а электроны, участвующие в связывании, равномерно распределены по всему кристаллу. Когда силы не имеют предпочтительного направления в пространстве (не обладают направленностью), то создаются условия для эффективной работы структур с ГЦК, ОЦК и ГПУ решетками.

Известно также, что для большинства металлов, испытывающих полиморфные превращения, ОЦК-решетка является высокотемпературной модификацией. Это характерно для Ni, Zr, Hf, Sc, Y, Sr, Be, Ca и связано с понижением относительной электронной концентрации при объемном расширении с 0,74 до 0,68. Так, коэффициенты компактности составляют для ГЦК (гранецентрированной) решетки 0,74, для ГПУ (гексагональной плотноупакованной) 0,74 и для ОЦК (объемноцентрированной) 0,68. Однако, ряд металлов, в т.ч. и железо, испытывают низкотемпературное полиморфное превращение с образованием менее плотноупакованной решетки « $\gamma$ -Fe –  $\alpha$ -Fe».

Такое полиморфное превращение трудно объяснить при помощи представлений об объемном сжатии. Объяснением может быть уменьшение электронной плотности в объеме, сопровождающееся увеличением ее концентрации по определенным направлениям, связывающим ионный остов. Это значит, что в металле должна убывать металлическая связь и возрастать доля ковалентной связи. Кроме того, в некоторых металлах становится существенным отталкивание ионных остовов, а в некоторых металлах, например, переходных металлах с незаполненной оболочкой становится важной ковалентная связь с участием электронов внутренних оболочек.

Для элементов, близких к середине периодической таблицы, теоретически трудно предсказать, образуют ли атомы элемента металл или ковалентный кристалл. Иногда и конкуренция между этими двумя структурами протекает в условиях, близких к равновесным. Так, прямой переход металлической связи в ковалентную происходит в олове: металлическое (белое) олово устойчиво при температуре выше  $13^{\circ}\text{C}$ , ковалентное (серое) устойчиво при температуре ниже  $13^{\circ}\text{C}$ . При этом теплота перехода из первой структуры во вторую значительно меньше  $1\text{эВ}$ , т.е. обе структуры обладают почти одинаковой энергией связи. С понижением температуры происходит сближение свободных электронов металлического и ковалентного кристалла данного элемента, что обуславливает либо одновременное образование ковалентной связи по типу олова, либо ее постепенное повышение (переходные металлы). Как следствие, образуется порог хладноломкости.

Таким образом, для металлической связи наиболее существенно то, насколько тесно упакованы ионные остовы и какова средняя кинетическая энергия электронов. В этом смысле меньшая хладноломкость ГЦК-решетки обусловлена не только ее высокой симметрией и наличием большего числа плоскостей скольжения, а также и большей электронной концентрацией внутри элементарной ячейки по сравнению с ОЦК-решеткой ( $V_{\text{ГЦК}}=1,46$ ,  $V_{\text{ОЦК}}=1,36$ ). Т.е. в ГЦК-решетке большее количество атомов являются коллективизированными по сравнению с ОЦК-решеткой.

Переход к направленной связи в ГЦК-решетке за счет большей плотности электронного облака происходит при более низких температурах. Этим также объясняется значительно более высокая пластичность ГЦК-металлов. За прочность в металле ответственна более сильная ковалентная связь или близкая к ней связь с неравномерным распределением электронного облака внутри решетки, а за пластичность – металлическая связь, обеспечиваемая более или менее равномерным распределением электронного облака по кристаллу.

При рассмотрении в этом ключе влияния легирующих элементов на хладноломкость можно отметить следующие особенности. Так, хорошо известно положительное действие углерода на стабилизацию ГЦК-решетки железа и одновременно значительное охрупчивание ее при низких температурах. С позиций влияния ковалентных связей на хладноломкость это объясняется привнесением углеродом при растворении в ГЦК-решетке до состояния  $\text{C}^{4+}$  дополнительной электронной плотности и, соответственно, стабилизации ГЦК решетки, и удерживающей ионный остов ковалентной составляющей.

Но в тоже время ковалентная связь углерода в железе, сочетаемая с высокой электроотрицательностью, приводит к дополнительной ковалентной направленности - упрочнению решетки с понижением пластичности.

Формирующаяся с понижением температуры направленность связи в железе, сопровождающаяся понижением растворимости углерода, приводит в

совокупности к хладноломкости. С уменьшением доли углерода в одной области, например, при термообработке литого сплава уменьшаются напряжения, вызываемые этим, столь сильным элементом, формирующим ковалентную связь.

Таким образом, приложение механической нагрузки необходимо идет на изменение энергии связи атомов материала, макрореализуемое через изменение прочности и пластичности. Изменение энергии связи с изменением температуры зависит от процессов взаимодействия энергетических уровней электронов в атомах материала и между собой. Изменение взаимодействия электронов с понижением температуры определяет характер соотношения прочности и пластичности между собой, т.е. переход к хрупкости. Повышение энергии связи в области переходных металлов снижает температуру перехода к хрупкости. В пределах d-переходных металлов повышение  $T_{хр}$  обусловлено формированием  $(n-1)d$  и  $nS$  гибридизации в области VIA-VIIA групп. Увеличение  $T_{хр}$  для непереходных металлов (IIA группа), обладающих высокой энергией связи, обусловлено рыхлостью  $SP^q$  связи, а повышение  $T_{хр}$  для металлов IVB группы связано с устойчивым  $SP^3$  состоянием, приводящим к максимуму энергии связи.

Итак, новая теория задает следующие направления, которые могут быть развиты для получения большего технического эффекта в снижении влияния хладноломкости:

1. Выбор материала для работы при низких температурах должен быть основан на поиске материалов с высокой энергией связи, причем большая ее часть должна реализоваться в форме коллективизированной связи электронов, гарантирующих высокую пластичность.
2. Легирование должно быть направлено на получение наиболее высокой энергии связи за счет наибольшего перекрытия электронных орбиталей; получения наибольшего количества коллективизированных электронов, отвечающих за пластичность и понижения доли ковалентной связи, отвечающей за хрупкость.
3. Принципиальная возможность получения прочных при комнатной температуре и высоковязких связей при криогенных температурах заключается в нахождении легирующих добавок, обеспечивающих превалирование ковалентной составляющей связи при комнатной температуре и увеличение металлической составляющей при криогенных.

### **Ограничения и перспективы развития новой теории**

Хотя элементы представленных теоретических положений были известны ранее через разработки квантовой химии и физики, а также квантовой механики и теории электронного строения, однако, не существовало ясной взаимосвязи между теоретическими положениями данных теорий и связи с механическими свойствами и, особенно, связи с хладноломкостью.

В тоже время работа над подобной теорией, где большинство построений относятся к анализу взаимодействия электронных структур, требует большого внимания к проведению расчетов. Ранее, когда автор пытался раскрыть эти закономерности (конец 80-х годов 20-го века), это было невозможно, поскольку не существовало соответствующих вычислительных мощностей.

Сегодня, в распоряжении исследователей суперкомпьютеры. Их применение показывает необыкновенные возможности в решении поставленных задач расчета состояний материала при помощи адекватных математических моделей и проводимых на их основе расчетов. Успехи группы Артема Оганова показывают, что это становится возможным, и подобные расчеты уже проводятся и способны предсказать с достаточной точностью свойства материалов на основе квантово-химических расчетов. С точки зрения ТРИЗ подобный переход означает, что активно воплощается еще один закон - замена механических связей программной связью частей, в нашем случае, ими можно считать замену механических испытаний, являвшихся ранее практически единственным методом получения достоверных данных о свойствах материалов, на расчеты и моделирование.

### **Заключение**

Что же нам дал ТРИЗ в решении этой задачи? Можно сказать, что он направил нас по правильному пути в поиске "трещин" в старой теории и разрешения ее противоречий: истинным решением проблемы порога хладноломкости стало разрешение теоретического противоречия о невозможности перехода металлической связи в ковалентную с падением температуры. Для устранения этого противоречия в понимании проблемы хладноломкости были применены понятия и средства из области физической химии и физического металловедения, и системный подход к анализу достигнутого уровня теоретического осмысления по системному оператору, рекомендуемые ТРИЗ.

"Прокачка" существующих теорий по основным законам развития технических систем, действующих в материалах на всех уровнях структур, использование открытий в надсистемной для материалов области - квантовой химии - позволило найти те объяснительные механизмы, которые приоткрывают завесу над тайной хладноломкости.

### **Литература**

1. Горобченко С.Л., Кривцов Ю.С. О механизме хладноломкости литых сталей и сплавов (К разработке теории легирования сталей для криогенных температур), CD ROM, СПб, 2012.
2. Сайто К. Химия и периодическая таблица, М., Мир. 1982. 320 стр.