

ЖАРОПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

1. Актуальность проблемы

В связи с развитием космической техники и некоторых специальных отраслей машиностроения особое внимание в настоящее время уделяется изучению влияния температуры на физико-механические характеристики стали. Учитывая, что при высоких температурах и напряжениях в стали многих марок с течением времени происходит изменение структуры, ухудшаются свойства, возникает необходимость изучения деталей проблемы.

2. Постановка проблемы

Изучение механизма сопротивления разрушению при действии высоких температур, влияние легирования на жаропрочность сплавов.

3. Основной материал

Сложность проблемы жаропрочности определяется влиянием повышенной температуры на механизм сопротивления металла пластической деформации и разрушению. С повышением температуры уменьшается эффективность влияния препятствий на движение дислокаций и они перемещаются в кристалле уже при гораздо меньших внешних силах.

При увеличении диффузионной подвижности атомов в условиях повышенных температур создаются условия для разрушения скоплений атомов растворенных элементов вокруг дислокаций. Это приводит не только к уменьшению предела текучести, но и к изменению вида кривой растяжения с повышением температуры испытания – исчезновению зуба (площадки) текучести.

Если препятствия для движения дислокаций были созданы в виде включений упрочняющей фазы оптимальной степени дисперсности, то при воздействии высоких температур вероятно коагуляция включений до размеров, оказывающих слабое влияние на торможение движущихся дислокаций, – возникает состояние перестарения, определяющее разупрочнение сплава.

При повышении температуры также снимается упрочнение, созданное различными обработками, предусматривающими увеличение плотности дислокаций и создание их сплетений. По мере нагрева происходит перераспределение дислокаций из таких группировок, рекомбинация в процессе переползания, уменьшение их плотности.

При определенном нагреве возможна также рекристаллизация, в процессе которой возникают новые зерна, уменьшается протяженность границ (при развитии рекристаллизации), а мигрирующие границы поглощают дислокации (во всяком случае, краевые).

Разупрочняющее влияние температурного фактора проявляется при изучении геометрии пластической деформации металлических монокристаллов. Обычно при сравнительно невысоких температурах по мере развития деформации число полос скольжения увеличивается вследствие включения в процесс новых объемов материала, и одновременно в каждой полосе возрастает величина сдвига. С повышением температуры число новых полос скольжения, отнесенное к приросту деформации, уменьшается, а смещение в каждой полосе скольжения существенно возрастает. Иными словами, с повышением температуры деформирования полосы скольжения становятся шире и контрастнее. Для алюминия, например, эта зависимость характеризуется следующими данными:

Температура деформации, °С	-180	20	250	300
Расстояние между полосами скольжения, мкм	0,5-1	2	4	10
Число линий скольжения, приходящихся на одну полосу скольжения	1-2	3-4	5-6	12

Следовательно, с повышением температуры происходит интенсивное разупрочнение в полосах скольжения, и дальнейшее увеличение деформации возможно по тем же полосам без образования новых очагов.

Описанные закономерности ползучести несколько идеализированы. При конкретных испытаниях технических металлов и сплавов, во-первых, отсутствуют четкие границы между отдельными стадиями ползучести, особенно между второй и третьей, а во-вторых, кривая ползучести не такая плавная, как это приведено на схеме, а имеет участки с максимумами и минимумами, обнаруживаемыми главным образом при умеренных напряжениях и большой длительности испытания. Исследования показали, что в течение всего периода ползучести происходят структурные изменения, продолжающиеся иногда в течение десятков лет. Изменения структуры могут вести и к повышению прочности, если они связаны с образованием дисперсных частиц упрочняющих фаз, и к снижению ее, если частицы коагулируют или их выделение приводит к созданию таких высоких напряжений, которые могут вызвать начало образования трещин. Фазовый анализ образцов теплоустойчивой хромомолибденовой стали, проведенный через разные промежутки времени испытания на ползучесть общей продолжительностью до 75 000 ч, обнаружил изменение химического состава и структуры карбидов.

По-видимому, со структурными изменениями в процессе испытания на жаропрочность следует связывать и изменения деформационной способности (предельной пластичности) сплавов, от которой во многом зависит его надежность в условиях высокотемпературной службы.

Изменение величины относительного удлинения с температурой при испытаниях с различными скоростями деформации выражается серией V-образных кривых: вслед за интервалом температур, при которых удлинение сохраняется примерно на постоянном уровне, наблюдается спад пластичности (до некоторой минимальной величины) и интенсивное развитие межкристаллитного разрушения, а затем новый рост пластичности. Чем меньше скорость деформации, тем при более низкой температуре начинается падение пластичности, тем ниже

уровень минимальной пластичности, однако и тем интенсивнее она растет при более высоких температурах. Такая зависимость изменения пластичности от продолжительности испытания позволяет связывать различный уровень деформационной способности со структурными изменениями.

Наряду с изменениями структуры в объеме сплава имеют большое значение и изменения на его поверхности. С.Т. Кишкин отмечает, что в условиях эксплуатации жаропрочных сплавов в поверхностном слое происходят окисление, обеднение легирующими элементами, возврат, рекристаллизация, а в ряде случаев образуются надрывы по границам зерен. Эти изменения определяют надежность и долговечность деталей при высокотемпературной службе. Диффузионная подвижность атомов в поверхностном слое сплава типа ХН78ТЮР толщиной 10 мкм возрастает в процессе эксплуатации (в течение 200-300 ч) в 2-4 раза. В ряде случаев окисление проникало вглубь деталей из этого сплава на 70 мкм, а необратимые повреждения по границам зерен (в виде надрывов) – на глубину до 0,3 мм.

Таким образом, при реальной оценке жаропрочности всегда следует иметь в виду неизбежные изменения структуры в процессе высокотемпературной службы, которые, очевидно, зависят от состава и обработки сплава, напряжения и температуры испытания. Понятно, что учесть все эти факторы во взаимодействии очень трудно, поэтому естественно стремление сделать эти изменения для данных условий высокотемпературной службы незначительными. Достигается это выбором таких состава и обработки металлического сплава, которые обеспечивали бы высокую стабильность его структуры в условиях совместного влияния температуры и напряжения.

Жаропрочный металлический сплав должен характеризоваться:

- 1) высоким уровнем сил межатомной связи, который определяет высокую энергию активации процесса начала движения дислокаций, а также их перемещения (с учетом того, что движущаяся дислокация проходит через ряд несимметричных положений);

2) особой тонкой субмикроскопической неоднородностью строения (по Г. В. Курдюмову), при которой достигается эффективное торможение дислокаций;

3) упрочненным состоянием приграничных зон, препятствующим развитию скольжения в этих участках объема зерен, что имеет большое значение в условиях высокотемпературной ползучести;

4) стабильностью строения сплава (внутри зерен и в приграничных объемах) в условиях одновременного действия температур и напряжений; эта стабильность строения связана с торможением диффузионных процессов (обычно в результате рационального легирования), которые в свою очередь определяются силами межатомной связи и характером структуры реальных сплавов.

Эти положения определяют особенности строения жаропрочных металлических сплавов.

Решающим фактором являются силы межатомной связи. Прочность этой связи в сплаве характеризуют следующие его константы;

1) температура плавления; однако по ней можно лишь приблизительно судить о силах межатомной связи, так как, рассматривая эту характеристику, надо учитывать свободную энергию и твердого тела, и жидкости, а также температуру полиморфного превращения (если оно имеется);

2) энергия связи, которую можно представить как работу, необходимую для расчленения кристалла на атомы. Энергия связи соответствует теплоте сублимации. Эта константа материала ближе определяет силы межатомной связи, но и она недостаточно полная;

3) среднеквадратичное отклонение атомов от положения равновесия при тепловых колебаниях их при данной температуре;

4) энергия активации диффузии и самодиффузии; эта константа материала находится в прямой зависимости от энергии связи и может быть использована для некоторой оценки прочности этой связи. Так, установлено, что отношение энергии активации самодиффузии к энергии связи для металлов с г. ц. к. решеткой колеблется в узких пределах: 0,65-0,67.

Более полная оценка прочности межатомной связи получается при расчетах с определением коэффициента диффузии D , который вместе с энергией активации Q входит в известное уравнение

$$D = D_0 e^{-Q/RT}$$

Преимущество этого метода оценки межатомной связи состоит в том, что предэкспоненциальный член D_0 зависит не только от энергии связи (как и Q), но также от ее производных, а главное, и от структуры сплава;

5) значения модуля упругости, температурного коэффициента изменения модуля упругости (являющегося третьей производной энергии по смещению атомов) или коэффициента термического расширения.

Следует отметить, что для получения полного представления о межатомных связях, обуславливающих прочность при высоких температурах, необходимо проводить комплексные исследования, а не ограничиваться определением какой-либо одной характеристики этих связей.

Значительную роль в развитии высокотемпературной ползучести играет возврат, поэтому целесообразно рассмотреть влияние легирования на его температурный порог.

Установлено, что под влиянием легирующих элементов температура интенсивного развития возврата повышается. Так, добавление 1 % Ni, Co, Si, Mn, Cr. или Mo к железу приводит к существенному повышению температуры возврата, отмеченному по сдвигу точки перегиба на кривой *температура–твердость* предварительно деформированных сплавов; эффективность влияния добавок увеличивается в указанном порядке. В других опытах показано, что достаточно добавить к спектрографически чистой меди всего 0,01% (по массе) олова и теллура, чтобы температура ее разупрочнения после деформации возросла на 200° С. В литературе приводится ряд других конкретных данных, характеризующих влияние легирования на сохранение деформационного упрочнения при нагреве различных металлов и сплавов.

Температура разупрочнения наклепанного чистого металла зависит от скорости самодиффузии в кристаллической решетке и эта температура имеет

определенную связь с точкой плавления. Такое положение справедливо и по отношению к сплавам; при этом надо помнить, что легирование может снижать температуру солидуса. Отсюда непрерывное увеличение степени легирования, даже в пределах растворимости, не может вести к непрерывному повышению температуры возврата.

Максимальное торможение разупрочнения при нагреве деформированных сплавов наблюдается лишь при определенной концентрации легирующих элементов. Установлено, что если данный состав сплава обеспечивает максимальное деформационное упрочнение, то он обеспечивает и максимальную температуру возврата. Такой сплав обладает и наиболее высоким сопротивлением ползучести, особенно на установившейся (второй) стадии.

Упрочнение твердых растворов в результате их легирования, связанное со скоплениями растворенных атомов вокруг дислокаций, для условий высокотемпературной службы должно быть согласовано со скоростью ползучести. Именно при данной скорости ползучести необходим определенный диапазон величин скорости диффузии, при котором атомы растворенного элемента достаточно подвижны, чтобы настигнуть дислокацию (но не настолько подвижны, чтобы проскользнуть мимо нее). Отсюда понятно, что для какой-либо одной скорости ползучести необходимо легирование каким-то определенным элементом (скорость диффузии которого оптимальна в этих условиях ползучести); для другой скорости ползучести это легирование может оказаться неэффективным. Поэтому для использования жаропрочного сплава в широком диапазоне скоростей ползучести необходимо комплексное его легирование несколькими элементами, атомы которых обладают различной подвижностью. Тогда «на каждой стадии ползучести будет, по крайней мере, один какой-нибудь легирующий элемент, подвижность которого будет приблизительно оптимальной для торможения движения дислокаций. Теория, таким образом, естественно подводит к идее использования сложнелегированных жаропрочных сплавов» (Коттрелл).

Нельзя думать, что любое легирование приводит к повышению сопротивления ползучести (как это могло бы следовать из общего рассуждения о тормозящем влиянии атмосфер). В условиях жаропрочности, помимо миграции атомов растворенных элементов к дислокациям, большую роль играет их диффузионная подвижность. Установлено, что в ряде случаев элементы, повышающие скорость диффузии в данном металле-растворителе, ускоряют ползучесть, и легирование ими будет приводить к разупрочнению жаропрочного сплава в конкретных условиях эксплуатации.

Как уже указывалось, в развитии высокотемпературной ползучести наряду с переползанием большое значение имеет скольжение в приграничных объемах, поэтому важное значение имеет распределение легирующих элементов в сплаве, в частности у границ зерен.

В связи с особенностями кристаллографического строения приграничных объемов и их различной ориентацией по отношению к действующему напряжению в них создается сложное напряженное состояние, характеризующееся, в частности, неравномерной концентрацией напряжений. Релаксация этих повышенных напряжений возможна лишь в процессе течения, которое в результате может распространяться также к другим приграничным объемам, неблагоприятно ориентированным относительно внешнего напряжения. В тех же случаях, когда передача деформации и вообще скольжение становятся невозможными (что связано не только с кристаллографией, но и со свойствами собственно кристаллов данного металла или сплава), концентрация напряжений в условиях ползучести не только не уменьшается, но и растет во времени. Когда в очаге деформации напряжение превышает предел прочности, возникает трещина, которая быстро распространяется по другим приграничным объемам, чему способствует их сложнапряженное состояние: образуется интеркристаллитный излом. Такой излом преимущественно наблюдается в тех случаях, когда деформация в приграничных объемах (даже благоприятно ориентированных) затруднена.

В некоторых случаях легирование может оказывать влияние в основном на сопротивление течению собственно зерен, лишь незначительно изменяя его в приграничных объемах. Тогда происходит концентрация напряжений в определенных пограничных зонах, в которых создаются условия для локализованного скольжения (но без его передачи в соседние, более прочные сердцевинные объемы зерен).

В этих условиях деформация в приграничных объемах затруднена из-за наличия прочной сердцевины зерен, и интеркристаллитное разрушение наблюдается сравнительно часто.

В случае чистых металлов скорость скольжения в приграничных объемах в первом приближении зависит от температуры плавления этих металлов. В случае сплавов экспериментально доказано преимущественное распределение легирующих элементов в приграничных объемах. В зависимости от того, будет ли в результате пограничной сегрегации повышена или понижена температура плавления в приграничных объемах, можно ожидать большего или меньшего развития приграничного скольжения.

При исследовании ряда конкретных сплавов (например, медь–кадмий или оловянистая бронза) установлено, что легирование элементами с очень большим (или очень малым) атомным диаметром и точкой плавления, более низкой, чем у основного металла (растворителя) приводит к возникновению интеркристаллитного излома в результате ползучести. Если же в сплавы (например, в β -латунь или в оловянистую бронзу) вводят элементы с близкими атомными размерами и более высокой, чем основной сплав, точкой плавления, то в условиях ползучести интеркристаллитный излом практически исключается.

Выводы

При повышении температуры, когда структурное состояние в пограничных зонах изменяется, в них в связи со структурной нестабильностью начинается сдвиговая деформация.

Тогда при этих повышенных температурах приобретает преимущественное развитие скольжение вблизи границ зерен и по этим местам обычно и происходит разрушение; отсюда жаропрочность крупнозернистого материала при этих температурах больше, чем мелкозернистого.

Следует отметить, что ни одна из характеристик прочности не обладает столь высокой чувствительностью даже к незначительным колебаниям состояния сплавов, как сопротивление ползучести. При исследовании 47 различных плавок одной марки среднеуглеродистой стали (в пределах марочного состава), установлено, что относительные колебания в скорости ползучести в конце пятидневного испытания при 450° С и одинаковой нагрузке составляли от 1 до 500 раз. Нередко наблюдается существенная разница в сопротивлении ползучести образцов, изготовленных из различных частей слитка. Разброс результатов длительных испытаний на ползучесть до разрушения можно уменьшить, если создать систему регулирования температуры с точностью $\pm 0,5$ град в течение всего времени испытания. При этом условии удастся также выявить и самые незначительные видоизменения кривых ползучести, определяемые металлургическими различиями плавок стали одной марки.

Список использованных источников:

1. Станюкович А. В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов / А. В. Станюкович. – М. : Metallurgy, 1967. – 199 с.
2. Mechanical Behavior of Materials of Elevated Temperatures / ed. J. E. Dorn. – N. Y. : Mc Grow Hill, 1961. – 529 p.
3. Масленников С. Б. Жаропрочные стали и сплавы: справочник / С. Б. Масленников. – М., : Metallurgy, 1983. – 192 с.

Лазаренко В.И., Оболенская Т.А., Калинин Н.В. «Жаропрочность металлов и сплавов».

В статье рассматривается механизм сопротивления разрушению при действии высоких температур и влиянии легирования на жаропрочность стали.

Ключевые слова: жаропрочность, сплав, дислокация.

Лазаренко В.І., Оболенська Т.О., Калінін Н.В. «Жароміцність металів та сплавів».

В статті розглянуто механізми опору руйнуванню при дії високих температур та вплив легування на жароміцність сталі.

Ключові слова: жароміцність, сплав, дислокація.

Lazarenko V.I., Obolenskaya T.A., Kalinin N.V. “The heat strength of metals and alloys”.

In the article the mechanism of strength to destroy in high temperature action influence of alloyed to heat strength of steely are examined.

Key words: heat strength, alloy, dislocation.

Стаття надійшла до редакції 18 вересня 2012 р.