

А.А. Бочвар

Основы термической обработки сплавов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
А11

А11 **А.А. Бочвар**
Основы термической обработки сплавов / А.А. Бочвар – М.: Книга по Требованию, 2024. – 298 с.

ISBN 978-5-458-60497-0

ISBN 978-5-458-60497-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ВВЕДЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

При изменении температуры все металлы и сплавы изменяют свои свойства. Происходящие изменения свойств металлов могут быть двух родов:

1) изменения, исчезающие при возвращении к начальной температуре;

2) изменения, целиком или отчасти сохраняющиеся и после возвращения к начальной температуре.

Изменения, или деформации, первого рода могут быть уподоблены упругим, а деформации второго рода — остаточным деформациям, возникающим при механической обработке металла.

Примером упругих деформаций объема, проявляющихся уже при самых незначительных изменениях температуры, может служить тепловое расширение или сжатие металла. Примером остаточных деформаций объема может служить изменение объема, наблюдаемое при нагреве до таких температур, при которых происходит самопроизвольный рост кристаллов.

Это изменение объема не исчезает и после прекращения температурного воздействия.

Также возможны и упругие и остаточные изменения и всех других свойств, как-то: электропроводности, твердости, сопротивления разрыву и т. д. Все остаточные изменения свойств связаны теснейшим образом с остаточными изменениями структуры металла, причем эти последние могут быть изменениями формы и размеров кристаллов, или изменениями внутрикристаллического строения, или, наконец, изменениями химического состава кристаллов.

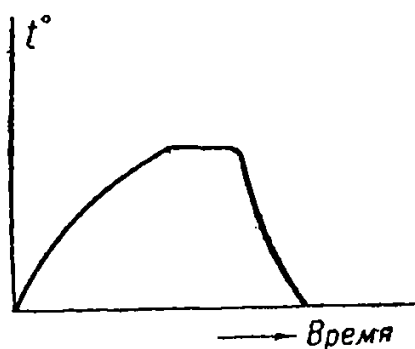
Целью термической обработки является изменение свойств металла или сплава и притом, конечно, изменение остаточное, не исчезающее при прекращении теплового воздействия. Объектом изучения в курсе термической обработки поэтому являются именно остаточные деформации свойств в их зависимости от основных факторов термического воздействия. Такими факторами являются температура и время воздействия. Характеристикой всякого термического воздействия может служить кривая температура — время (фиг. 1).

Для полной характеристики процесса изменения температуры необходимо дать, кроме начальной и максимальной температур, еще

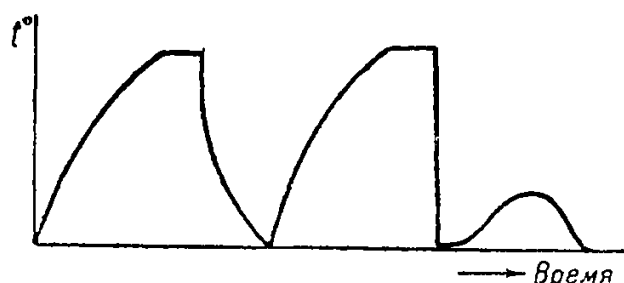
и длительность нагрева, выдержки при максимальной температуре и охлаждения.

Вместо длительности нагрева или охлаждения можно дать среднюю скорость нагрева или охлаждения $\frac{t_{\max} - t_0}{T}$, где T — время, или, что гораздо точнее характеризует процесс, истинную скорость при определенной температуре, т. е. величину $\frac{dt}{dT}$. При более сложных видах термообработки приходится повторять нагрев и охлаждение по два или даже по три раза.

Примерная схема сложной термообработки, состоящей из нормализации, заковки и отпуска, дана на фиг. 2.



Фиг. 1. График простой термической обработки



Фиг. 2. График сложной термической обработки

Поскольку цель термической обработки — остаточные изменения свойств, необходимо обратиться прежде всего к исследованию вопроса, когда и какие остаточные изменения возможны, установить таким образом условия принципиальной возможности термообработки, а затем уже, ознакомившись детально с характером изменений, перейти к выяснению условий технической осуществимости и выгодности термообработки.

Рассматривая всю совокупность изменений свойств, наблюдаемых при термической обработке металлов и сплавов, мы можем подразделить их на пять больших групп и соответственно этому будем иметь пять видов термической обработки.

1. В первую группу можно выделить изменения, идущие самопроизвольно и требующие для своего возникновения только нагрева до температуры, при которой кинетическая энергия атомов делается настолько большой, что становятся возможными перемещения атомов внутри кристаллов или с одной кристаллической решетки на другую, т. е. с одного кристалла на другой.

Явление перемещения атомов внутри кристалла делает возможным выпрямление атомных слоев решетки, которые могли быть искривлены при деформировании кристаллов под действием упругих напряжений. При выпрямлении решетки происходит снятие напряжений и кристалл вновь приобретает повышенную пластичность. Только что описанное явление обычно носит название возврата (возвращение к исходным до деформации значениям

свойств). Явление перемещения или перескока атомов с одного кристалла на другой делает возможным рост одного кристалла за счет другого и при достаточном развитии может повести к полному изменению структуры металла. Это явление, наблюдаемое при нагреве деформированных металлов, обычно носит название рекристаллизации (новая, повторная кристаллизация).

К числу самопроизвольно идущих необратимых изменений относятся, кроме возврата и рекристаллизации, также и изменения концентрации, ведущие посредством диффузии к выравниванию тех неровностей состава, которые вызваны внутрикристаллической ликвацией. Выравнивание концентрации посредством диффузии возможно (в пределах одного кристаллита) и в литых недеформированных сплавах.

В случае многофазных сплавов неравновесное литое состояние характеризуется преждевременным появлением новых фаз. Путем выравнивания концентрации или гомогенизации основного раствора можно добиться (за счет растворения) рассасывания скоплений второй фазы. При этом, если растворяющаяся вторая фаза обладает большой хрупкостью (например в алюминиевых сплавах CuAl_2 , $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ в бронзах и т. д.), то при такой гомогенизации удастся значительно повысить пластичность сплава.

Явления разбираемого типа имеют то общее, что все они ведут к установлению устойчивого физико-химического и структурного равновесия.

Все процессы эти необратимы и идут (при достаточно высокой температуре) самопроизвольно с выделением теплоты.

Заметные местные изменения концентрации, сопровождающиеся исчезновением дендритной структуры, и еще более заметное изменение размеров кристаллов не могут не оказать влияния на механические и химические свойства металлов. Если то направление, в котором свойства изменяются при выравнивании концентрации или при росте кристаллов, является для нас желательным, то мы можем эти изменения вызвать искусственно, подвергая металлы или сплавы соответствующему нагреву, т. е. термической обработке. При выравнивании концентрации благодаря устранению гальванических пар между дендритными осями и междуосными пространствами происходит повышение химической стойкости сплава. Процесс укрупнения зерна сопровождается (до некоторого предела) ростом удлинения и числа Эриксона (в металлах кубической системы) и падением сопротивления разрыву, твердости и электросопротивления. Другими словами, в процессе укрупнения зерна, т. е. рекристаллизации, как и в процессе возврата, свойства изменяются в направлении, обратном тому, в каком они изменяются при механической обработке. Помимо того, при всяком нагреве происходит в высшей степени желательное снятие упругих внутренних напряжений.

Если нужно уничтожить повышенную твердость наклепанного, т. е. механически обработанного металла, то достаточно подвергнуть

его термической обработке. Отжиг сопровождает механическую обработку и для цветных металлов является одной из наиболее важных операций термической обработки. В зависимости от того, какие изменения свойств необходимо произвести, можно различать следующие разновидности отжига:

- 1) отжиг (возврат) для снятия внутренних напряжений и частичного устранения наклепа;
- 2) отжиг (рекристаллизация) для уничтожения наклепа и
- 3) отжиг (выравнивание состава или гомогенизация) для повышения химической стойкости литых сплавов, а в случае многофазных сплавов и для повышения пластичности.

Для характеристики отжига необходимо указать максимальную температуру, которая может колебаться в довольно широких пределах, и время выдержки при этой температуре. Скорость нагрева или охлаждения в этом случае большой роли не играет и влияние ее сводится к тому, что при очень малых скоростях нагрева и охлаждения как бы увеличивается время выдержки.

2. Изменения второго типа в отличие от изменений первого типа могут происходить лишь в некоторых металлах и сплавах, а именно только в таких, в которых имеются какие-нибудь фазовые превращения в твердом состоянии. Такими превращениями для чистых металлов являются превращения одной аллотропической формы в другую, а для сплавов, кроме того, превращения, связанные с изменением взаимной растворимости каких-нибудь составляющих. Коротче говоря, необходимым условием возможности изменений второго типа является наличие фазовых превращений. Изменения второго типа вызываются той перекристаллизацией, которая происходит при переходе через температуру фазового превращения, и сводятся при нагревании к частичному или полному уничтожению прежней структуры, а при обратном охлаждении — к восстановлению нормального физико-химического (но не структурного) равновесия. После охлаждения структура сплава будет состоять из тех же элементов, что и до нагрева, но форма и распределение структурных элементов могут быть совершенно иными.

Перекристаллизация при переходе через точку превращения может сопровождаться и обычным ростом кристаллов (рекристаллизацией). Перекристаллизация эта не требует для своего возникновения предварительной механической обработки (как это требовалось для рекристаллизации) и происходит одинаково как в литых, так и в механически обработанных сплавах.

Существенным отличием процесса перекристаллизации от процессов первого типа (рекристаллизации, диффузии) является обратимость первого и необратимость последних. В то время как выросшее при рекристаллизации зерно не может быть измельчено до прежнего состояния никаким нагревом и никаким охлаждением, зерно, полученное в результате перекристаллизации второго типа, повторением этой перекристаллизации, по желанию может быть и уменьшено и увеличено и изменено в отношении его формы.

Вид термообработки, вызывающий фазовую перекристаллизацию, чаще всего носит название отжига и может быть по названию спутан с отжигом первого типа. Было бы лучше отличать термообработку второго типа от термообработки первого типа и называть второй вид термообработки фазовой перекристаллизацией.

Для осуществления фазовой перекристаллизации необходимо, конечно, нагревать сплав по крайней мере выше температуры начала фазового превращения.

Для характеристики фазовой перекристаллизации необходимо давать, помимо уже указанных для отжига первого рода максимальной температуры нагрева и времени выдержки, еще скорость нагревания и, что особенно важно, скорость охлаждения, которая оказывает решающее влияние на ход обратного превращения. Фазовая перекристаллизация проводится в разных случаях с различной целью. Очень часто фазовую перекристаллизацию используют для устранения следов деформации (устранение волокнистой структуры, снятие напряжений) в тех сплавах, в которых невозможна обычная рекристаллизация. Часто путем фазовой перекристаллизации заменяют грубую структуру литого сплава на более мелкую и таким путем уменьшают хрупкость сплава. И в том и в другом случае иногда умышленно вынимают нагретые изделия из печи на воздух и таким образом ускоряют охлаждение, чтобы получить более мелкую структуру с повышенной прочностью, и тогда операцию термообработки называют нормализацией.

Если желательно смягчить изделия перед их последующей обработкой, то, наоборот, замедляют, по крайней мере в некотором интервале температур, охлаждение. Именно к такой разновидности фазовой перекристаллизации на практике применяют общий термин — отжиг.

Далее, фазовую перекристаллизацию применяют с целью изменения пластинчатой (игольчатой) формы хрупких фаз в менее вредную округленную зернистую форму. В этом случае операцию термообработки называют сфероидизацией. Механизм сфероидизации основан на том, что разные по величине и по форме кристаллики одной фазы различно растворимы в кристаллах другой фазы, и наименее устойчивыми являются кристаллы или отдельные места кристаллов с наиболее развитой поверхностью (большое количество свободной поверхностной энергии).

Если при фазовой перекристаллизации применить очень большую скорость охлаждения, то обратное превращение может пройти неполностью. Тогда мы будем иметь дело с изменениями третьего типа.

3. Третью группу изменений, происходящих в металлах при их термической обработке, составляют изменения, не приближающие металл к состоянию устойчивого физико-химического и структурного равновесия, а, наоборот, удаляющие от такого состояния равновесия. Самая возможность такого рода изменений основана на том, что все процессы и все изменения происходят в металлах не

моментально, а протекают во времени. Скорость одних процессов такова, что самой большой достижимой скорости изменения температуры недостаточно для опережения этих процессов. В других случаях скорость процессов настолько мала, что мы в состоянии с такой скоростью изменить температуру, что процесс не успеет совершиться, и тогда нам удастся непосредственно зафиксировать при какой-нибудь температуре состояние металла, свойственное другой, более высокой или более низкой температуре.

До сих пор неизвестны случаи прочной фиксации при более высоких температурах состояний, свойственных более низким температурам. Возможна только кратковременная фиксация такого рода: например можно перегреть смесь двух родов кристаллов прежде, чем произойдет их взаимное растворение. Зато в целом ряде случаев удается зафиксировать при низких температурах состояния, свойственные высоким температурам. Для этого необходимо, чтобы, во-первых, скорость охлаждения была больше скорости процесса обратного изменения и чтобы, во-вторых, выбранная температура (например комнатная) была настолько низка, чтобы вязкость вещества не позволила ему вернуться в более устойчивое состояние. Вид термической обработки, приводящий к фиксации неустойчивых состояний, называется *з а к а л к о й*.

Условием принципиальной возможности или невозможности закалки какого-нибудь сплава будет наличие или отсутствие какого-нибудь превращения в нем при нагревании. Удовлетворяется ли это условие, всегда можно решить по виду диаграммы состояния данного сплава. Если фигуративная точка рассматриваемого сплава при нагревании пересечет какую-нибудь линию превращения в твердом состоянии (практический интерес представляет только такая термообработка металлов, при которой не приходится переходить за солидус), то закалка принципиально возможна. Условием же технической осуществимости закалки является возможность создания скорости охлаждения большей, чем скорость процесса фазового превращения. При анализе явлений закалки мы остановимся вкратце и на современных способах достижения больших скоростей охлаждения и на методах измерения их. Обращаясь к примерам, мы можем из вида диаграммы состояния бинарных сплавов Fe-C, Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Al и т. д. заключить, что закалка возможна для всех сплавов серии Fe-C, для сплавов Cu-Zn с содержанием цинка более 32%, для сплавов Cu-Sn с содержанием олова более 2—3% и для сплавов Cu-Al с содержанием алюминия более 9%. Для всех этих сплавов закалка оказывается не только возможной, но и осуществимой. Во всех случаях закалка фиксирует полностью или отчасти структуру, свойственную высокой температуре, но не во всех случаях фиксирование этой структуры сопровождается желательными изменениями свойств. Так, закалка латуней до сих пор не представляет никакого интереса, ибо изменения свойств, вызываемые закалкой, или нежелательны (например при 35% Zn) или мало эффективны (при 44% Zn).

Обращаясь к примерам из области чистых металлов, мы видим принципиальную возможность закалки для всех полиморфных металлов. Но только для олова закалка оказывается выполнимой и притом настолько легко, что не нужно создавать повышенной скорости охлаждения для осуществления этой закалки. Нормальное белое олово при комнатной и более низких температурах является закаленным.

Для характеристики процесса закалки необходимо давать максимальную температуру, время выдержки при ней и, что особенно важно, скорость охлаждения. Скорость охлаждения желательно давать истинную для температуры того фазового превращения, которое мы стараемся задержать закалкой. Максимальная температура нагрева при закалке определяется, как и при фазовой перекристаллизации, температурой фазового превращения. Здесь уместно напомнить, что связь температуры закалки с температурой фазового превращения впервые была установлена Д. К. Черновым.

В большинстве случаев посредством закалки фиксируют состояние твердого раствора (solution treatment). В одних случаях закалка на твердый раствор приносит увеличение, в других случаях уменьшение твердости и крепости на разрыв.

Закалка есть не что иное, как переохлаждение до температур, при которых превращение или уже не может идти в силу большой вязкости вещества (например Al-Cu), или еще не может начаться в силу малой скорости превращения (например Sn).

За. Очень часто истинная закалка, т. е. получение без изменения структуры, свойственной высоким температурам, не удается, так как во время охлаждения уже при сравнительно низких температурах под действием возникающих термических напряжений происходит фазовое превращение. Фазовое превращение при очень сильных переохлаждениях и при наличии сильных напряжений в кристаллах распадающихся и образующихся фаз приводит к результатам, отличным от тех, которые получаются при перекристаллизации в менее переохлажденном состоянии. Именно, в условиях превращения в напряженной кристаллической среде превращение протекает много быстрее, несмотря на более низкую температуру; далее, анизотропность среды сильнее сказывается на микроструктуре продуктов распада, дисперсность продуктов распада оказывается очень высокой, а решетки образующихся фаз оказываются искаженными, часто настолько, что их можно считать промежуточными метастабильными фазами. Обычно состояния, полученные при такой фазовой перекристаллизации, также называют закаленными. Хотя это название и не совсем правильно, нам приходится считаться с ним в силу его распространенности.

Термообработку, приводящую к только что описанным результатам, можно рассматривать или как новый вид закалки на промежуточные высокодисперсные или метастабильные состояния, или же как совмещение в одной операции истинной закалки с отпуском (см. п. 4). Конечно, данный вид термообработки можно рассматри-

вать и как частный случай фазовой перекристаллизации в особых условиях очень сильного переохлаждения и напряженности среды.

4. Закаленное состояние сплава является метастабильным, неустойчивым состоянием, но для возвращения к устойчивому состоянию необходима некоторая определенная степень подвижности атомов сплава и потому, если температура, при которой мы рассматриваем закаленный сплав, низка, то самопроизвольное возвращение сплава в устойчивое состояние не начнется. Если температура окружающего закаленный сплав пространства настолько высока для данного сплава, что атомы его обладают возможностью перемещаться внутри решетки, то пойдет самопроизвольное возвращение к устойчивому состоянию — начнется самопроизвольный отпуск или старение. Самопроизвольный отпуск пойдет тем быстрее, чем выше температура сплава. В тех случаях, когда для самопроизвольного отпуска температура слишком низка, необходимо нагреть сплав, чтобы увеличить подвижность атомов и сделать возможным возвращение к устойчивому состоянию. Такой нагрев сплава называется искусственным отпуском или искусственным старением.

Поскольку закалка в большинстве случаев фиксирует состояние твердого раствора, постольку отпуск вызывает процесс распада закаленного твердого раствора на его составляющие (*precipitation treatment*). Распад твердого раствора неминуемо должен пройти через несколько стадий:

1) атомы выпадающего из раствора вещества должны собраться к определенным центрам;

2) если из раствора выпадает интерметаллическое вещество, то должно произойти образование молекул его;

3) у образовавшихся таким образом центров распада должен идти рост кристалликов выпадающего вещества. Образующаяся в первые стадии распада решетка выпадающего вещества, так же как и решетка основного раствора, должна быть искажена за счет напряжений, возникающих от установления неравномерной концентрации.

Первые две стадии предшествуют третьей, а потому при низких температурах отпуска идут преимущественно две первые стадии распада, хотя несомненно все стадии налагаются друг на друга. Для некоторых сплавов распад закаленного твердого раствора частично успевает пройти в самый момент закалки (закалка стали на мартенсит), для других распад происходит при вылеживании при комнатной температуре (например для дуралюмина), для третьих для начала распада требуется повышение температуры, т. е. искусственный отпуск (например для бериллиевой бронзы).

Так как распад закаленного твердого раствора при отпуске происходит при сравнительно низких температурах, то результатом является высокодисперсная смесь продуктов распада твердого раствора. С повышением температуры отпуска и с увеличением вре-

мени выдержки при температуре отпуска идет укрупнение, коагуляция уже выделившихся частиц. Чем мельче выпадающие частицы, тем тверже сплав.

В первые две стадии распада происходит искажение или по крайней мере нарушение однородности кристаллической решетки, следствием чего является повышение электросопротивления и твердости сплава. В третью стадию, во время коагуляции кристаллических выделений, восстанавливается нормальная структура решетки, а электросопротивление и твердость понижаются.

Вид термической обработки, вызывающий распад закаленного твердого раствора, можно, как уже сказано, называть отпуском, но ввиду различного влияния разных стадий отпуска на механические свойства сплавов следует различать «упрочняющий» отпуск при температурах, близких к температуре начала распада твердого раствора, и «смягчающий» отпуск при более высоких температурах. Упрочняющий отпуск часто называют явлением дисперсионного твердения.

Продуктами высокотемпературного отпуска обычно являются те же составляющие, которые образуются при нормальном медленном охлаждении, и отпущенный сплав состоит из тех же фаз, что и отожженный. Поэтому можно сказать, что отпуск возвращает сплав в состояние физико-химического равновесия. Структура же отпущенного сплава (а потому и свойства его) сильно отличается от структуры отожженного сплава. Для характеристики отпуска необходимо давать температуру нагрева и время выдержки при этой температуре. Скорости нагрева и охлаждения в большинстве случаев (ср. гл. V о хрупкости при отпуске) большого значения не имеют, и влияние их сводится к тому, что уменьшение этих скоростей равнозначно некоторому увеличению времени выдержки. Отпуск, как и рекристаллизация, является процессом необратимым и идет самопроизвольно с выделением теплоты.

5. Все до сих пор разобранные изменения протекают в металлах без химического взаимодействия с окружающей средой. Из процессов, протекающих при взаимодействии с окружающей средой, технический интерес представляют процессы цементации. Основой всех этих процессов является диффузия в чистом виде или диффузия в комбинации с реакциями окисления (выгорание).

Все эти процессы химико-термической обработки вызывают изменения состава (хотя бы местные). Сюда относятся процессы цементации стали, децементации чугуна (ковкий чугун), нитрирования, алитирования, силицирования и т. д. Процессы цементации часто применяются в чистом виде, а еще чаще в комбинации с закалкой и отпуском.

Познакомившись с видами термообработки и с их номенклатурой, мы должны остановиться пока вкратце на результатах, достигнутых применением термообработки, т. е. выявить, в какой мере свойства металлов меняются при разных видах термической обработки.

Ограничимся одним-двумя примерами на каждый вид термообработки.

1. Наклепанная медь обладает следующими механическими свойствами:

$$\sigma_b = 45 \text{ кг/мм}^2; \delta = 1 - 2\%$$

После правильного отжига получаем

$$\sigma_b = 22 \text{ кг/мм}^2; \delta = 45\%$$

Изменения, приносимые термообработкой, выражаются в 100—2000%.

2. Литая сталь с 0,2% С характеризуется большой хрупкостью (малым сопротивлением удару и малым удлинением):

$$\sigma_b = 45 \text{ кг/мм}^2; \delta = 15\%; \rho = 2 \text{ км/см}^2.$$

После нормализации (фазовой перекристаллизации) получаем

$$\sigma_b = 48 \text{ кг/мм}^2; \delta = 29\%; \rho = 9 \text{ км/см}^2.$$

Порядок изменения величин δ и ρ колеблется в пределах от 100 до 350% соответственно.

3. Сплав алюминия с 4% меди в отожженном виде имеет временное сопротивление 20 кг/мм^2 , а после закалки на твердый раствор 30 кг/мм^2 . Наоборот, бериллиевая бронза после закалки делается мягче и менее прочной на разрыв.

За. Инструментальная сталь с 0,8% С до закалки характеризуется следующими механическими свойствами:

$$\sigma_b = 85 \text{ кг/мм}^2; \delta = 9\%$$

и твердость 200 по Бринелю.

После технической закалки на мартенсит

$$\sigma_b = 140 \text{ кг/мм}^2; \delta = 0,0\%$$

и твердость 600 по Бринелю.

4. Дуралюмин в отожженном виде имеет

$$\sigma_b = 23 \text{ кг/мм}^2; \delta = 20\%$$

и твердость 50 по Бринелю.

После закалки и старения

$$\sigma_b = 45 \text{ кг/мм}^2; \delta = 20\%$$

и твердость 120 по Бринелю.

5. Специальная сталь с 0,30% С, 1,0% Al и 1,5% Cr до нитрирования обладает твердостью приблизительно 200 по Бринелю. Твердость этой же стали после нитрирования равна 1000 по Бринелю.

Из этих немногих примеров видно, какое громадное значение имеет термическая обработка. Значение термообработки как самостоятельного отдела науки о металлах теперь общепризнано. По