

№ 2137

С.А. Никулин
В.Ю. Турилина

Материаловедение

Специальные стали и сплавы

Учебное пособие

№ 2137

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра металловедения и физики прочности

С.А. Никулин

В.Ю. Турилина

Материаловедение

Специальные стали и сплавы

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению Металлургия



Москва 2013

УДК 669.017
Н65

Рецензент

д-р тех. наук, проф. *С.В. Добаткин* (ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН)

Никулин, С.А.

Н65 Материаловедение: специальные стали и сплавы : учеб.
пособие / С.А. Никулин, В.Ю. Турилина. – М. : Изд. Дом
МИСиС, 2013. – 123 с.
ISBN 978-5-87623-679-1

Пособие содержит материал, необходимый для самостоятельной подготовки студентов к лекциям и практическим занятиям по дисциплинам «Материаловедение», «Металловедение и термическая обработка металлов», «Специальные сплавы», «Специальные стали и сплавы». Рассмотрены принципы легирования и основы создания различных групп сталей; показано влияние легирующих элементов на фазовые превращения; представлены данные о составе, свойствах и обработке основных групп промышленных сталей и сплавов. Этот материал поможет студентам освоить методики подхода к выбору марки стали и необходимого режима термической обработки для получения заданного уровня свойств с учетом экономической составляющей.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 150100 «Материаловедение и технологии материалов», 150400 «Металлургия», 011200 «Физика».

УДК 669.017

ISBN 978-5-87623-679-1

© С.А. Никулин,
В.Ю. Турилина, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Специальные стали	5
1.1. Неметаллические включения и примеси в стали	5
1.2. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали. Классификация и маркировка сталей	10
1.3. Строительные стали. Углеродистые качественные стали	16
1.4. Улучшаемые стали	22
1.5. Цементуемые стали. Азотируемые стали	27
1.6. Высокопрочные стали. Мартенситно-старяющие стали	32
1.7. Подшипниковые стали. Рессорно-пружинные стали	35
1.8. Износостойкие стали	37
1.9. Коррозионно-стойкие стали	40
1.10. Криогенные стали. Литейные стали	43
1.11. Инструментальные стали	46
1.12. Жаропрочные стали и сплавы	53
1.13. Теплостойкие стали	55
1.14. Жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы	55
2. Специальные сплавы	57
2.1. Никель и жаропрочные никелевые сплавы. Железникелевые сплавы	57
2.2. Жаропрочные сплавы на основе кобальта	64
2.3. Тугоплавкие металлы (ванадий, ниобий, тантал, молибден, вольфрам) и сплавы на их основе	66
2.4. Титан и его сплавы	82
2.5. Циркониевые сплавы: состав, свойства и области применения	87
2.6. Медь и медные сплавы	93
2.7. Сплавы алюминия	106
2.8. Магниевого сплавы	117
Библиографический список	122

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что технологии производства специальных сталей и сплавов являются наиболее сложными в металлургии; для их изготовления требуются наукоемкие технологии, сложное оборудование и высокая технологическая культура производства. Ранее традиционно считалось, что потребность в сталях со специальными свойствами испытывает в основном оборонный комплекс страны и такие стратегические отрасли, как авиация, космос, судостроение и т.п.

Однако сегодня специальные стали и сплавы становятся все более востребованы не только в производстве военной техники и тяжелом машиностроении. Их активно используют и в других отраслях промышленности. Интенсивное наступление в гражданскую сферу вызвано прежде всего особыми свойствами – высокой прочностью, износостойкостью и т.п., что позволяет получать конструкции с меньшим по сравнению с традиционным сырьем весом, а также прямой финансовой выгодой, так как за счет использования в производстве дорогих специальных сталей может значительно сократиться конечная цена изделия из-за меньшей металлоемкости, габаритов, улучшения прочностных характеристик и т.д.

Основное отличие специальных сталей и сплавов – это не только сложное легирование различными элементами, но также применение для производства современных методов деформационно-термической обработки продукции.

Пособие содержит материал, необходимый для самостоятельной подготовки студентов к лекциям и практическим занятиям по дисциплинам «Материаловедение», «Металловедение и термическая обработка металлов», «Специальные сплавы», «Специальные стали и сплавы». Рассмотрены принципы легирования и основы создания различных групп сталей и сплавов; показано влияние легирующих элементов на фазовые превращения и структуру; представлены данные о составе, свойствах и обработке основных групп промышленных сталей и сплавов.

Этот материал поможет студентам освоить методики подхода к выбору марки стали и сплава и необходимого режима термической обработки для получения заданного уровня свойств с учетом экономической составляющей.

1. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАЛИ

1.1. Неметаллические включения и примеси в стали*

Качество специальных сталей зависит от исходных материалов и технологии производства, определяющих содержание примесей и неметаллических включений, макро- и микронеоднородность состава, структуры и свойств.

В соответствии с диаграммой фазового равновесия затвердевающий металл и расплав различаются по составу (последние порции расплава могут приближаться по составу к легкоплавкой эвтектике). Поскольку кристаллы растут от поверхности к оси слитка, есть разница в составе и по его сечению – зональная ликвация. Она зависит от вида диаграммы состояния, скорости затвердевания, направления теплоотвода при кристаллизации. Кроме серы и фосфора, зональная ликвация других элементов практически малосущественна. Для предотвращения осевой ликвации серы используют кальций и редкоземельные металлы (РЗМ) для замены легкоплавкой эвтектики $MnS-FeS$ тугоплавкими CaS и CeS , а также электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке (в 5 раз ослабляющее ликвацию серы) и т.п.

Предотвращение дендритной ликвации – неоднородности химического состава внутри кристалла (дендрита), порождающей такие дефекты проката, как структурная полосчатость или карбидная строчечность, начинают с расплава, с изменения его состояния перед кристаллизацией. Дендритная ликвация усиливается в сплавах с широким интервалом кристаллизации. Она может быть частично ослаблена с помощью гомогенизационного отжига.

Важными элементами структуры, во многом определяющими технологические, механические свойства и сопротивление разрушению сталей, являются неметаллические включения. К ним относятся химические соединения, образовавшиеся в стали в процессе ее производства – выплавки и разливки. Они обычно занимают долю объема v от 10^{-3} в рядовой стали до 10^{-4} – в наиболее чистой (после рафинирующих переплавов). Неметаллические включения влияют на процессы роста зерна, разрушения, фазовые и структурные превращения в стали.

* В разделе использованы материалы: Штремель М.А., Кудря А.В. Качество стали // Сталь на рубеже столетий / Под ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСиС, 2001. С. 469–509.

Включения делятся на эндогенные – образовавшиеся в стали в процессе выплавки в результате химических реакций, и экзогенные – появляющиеся извне из-за нарушения технологии выплавки (от захвата металлом шлака или крошек огнеупора).

Неметаллические включения в стали – это соединения элементов с серой, кислородом, азотом. Различают кислородные включения (оксиды), сульфиды и нитриды.

Кислородные включения (рис. 1.1) наиболее многочисленны. Чаще всего они образуются в результате раскисления стали. Но могут быть и экзогенными.

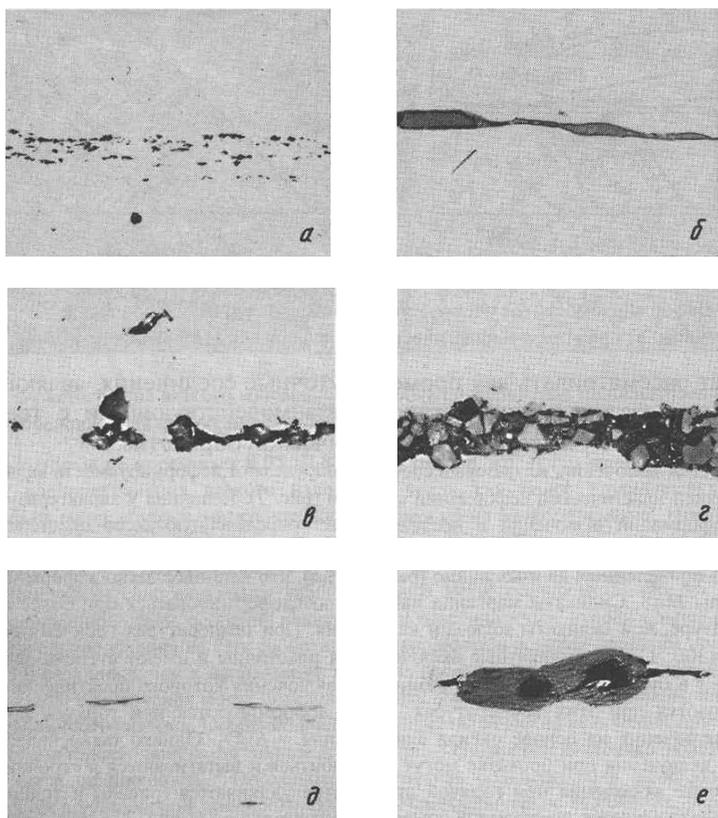


Рис. 1.1. Кислородные (а-г) и сульфидные (д, е) неметаллические включения деформированной стали:
а – глинозем, $\times 100$; б – силикаты пластичные, $\times 100$;
в – силикаты хрупкие, $\times 500$; г – сложные оксиды, $\times 500$;
д – сульфиды, $\times 100$; е – окисульфиды, $\times 500$

Сульфидные включения (см. рис. 1.1) образуются при затвердевании стали. В основном в сталях образуются сульфиды железа (FeS) и марганца (MnS).

Абсолютно вреден сульфид железа, эвтектика которого Fe–FeS плавится при 975 °С, образуя пленку по границам зерен. Сталь становится горячеломкой. Для предотвращения горячеломкости содержание марганца в стали должно обеспечиваться в пропорции $[Mn] : [S] \gg 40\text{--}50$ для образования тугоплавкого сульфида марганца – MnS.

Нитриды относят к неметаллическим включениям только тогда, когда они являются продуктом соединения остаточного азота (менее 0,008 %) с нитридообразующими элементами (алюминий, титан и др.), попавшими в сталь случайно в количествах до 0,02...0,03 % либо введенными в нее с раскислителями.

По В.И. Явойскому, включения в слитке классифицируются по происхождению следующим образом:

первичные – существующие в исходном расплаве;

вторичные – образующиеся при охлаждении расплава;

третичные – возникающие при кристаллизации;

четвертичные – выпадающие после затвердевания из твердого раствора в железе.

Качество металла зависит от объемной доли включений, их размера, формы, однородности размещения в прокате. В ковше все включения равноосные, в слитке – их большинство. Размеры равноосных включений – от 0,01 мкм до 1...10 мм. Зависимость свойств стали от размера включений приведена на рис. 1.2.

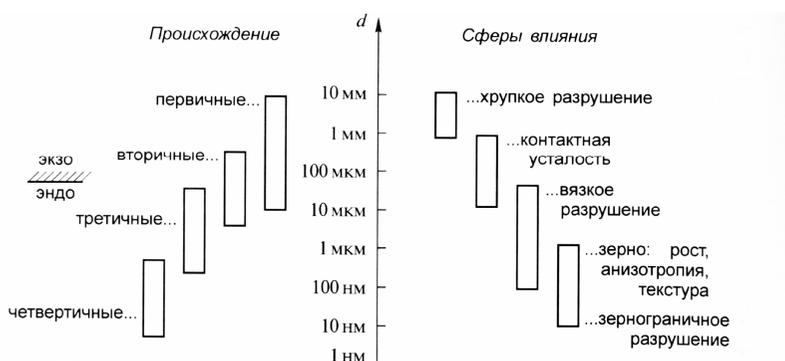


Рис. 1.2. Происхождение равноосных неметаллических включений и сферы их влияния на свойства стали

Распределение первичных и вторичных включений по зонам слитка определяется скоростью всплытия, конвективными потоками расплава струи металла при разливке, его перемешиванием. Третичные включения в пределах дендрита размещаются в местах кристаллизации, места зарождения четвертичных включений связаны с дендритной неоднородностью состава раствора, с зеренной структурой после кристаллизации.

При прокатке форма и размеры неметаллических включений могут резко меняться. Макроскопические включения (шлаковые, пленки, пузыри слитка и др.) вытягиваются горячей прокаткой в строчки – волосовины, которые при нагружении или при закалке становятся трещинами.

Деформируемость включений оценивают по их удлинению $\epsilon_{\text{вкл}}$ в сравнении с удлинением металла $\epsilon_{\text{м}}$: $\nu = \epsilon_{\text{вкл}} / \epsilon_{\text{м}} \leq 1$. Она очень сильно различается для включений разного состава (рис. 1.3).

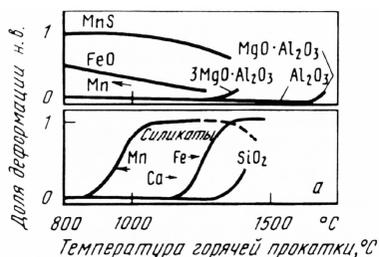


Рис. 1.3. Деформируемость неметаллических включений (н.в.) при горячей пластической деформации

Вытянутое включение гораздо опаснее равноосного того же объема, поэтому одна из задач микролегирования и управления расплавом – превращение включений в недеформируемые.

Собственно неметаллические включения (микроскопические) по деформируемости делят на три класса: недеформируемые глобулы (SiO₂); недеформируемые оксиды, дробящиеся в строчки (корунд Al₂O₃, алюминаты кальция CaO · Al₂O₃, шпинели MgO · Al₂O₃); пластичные сульфиды и силикаты (SiO₂ · CaO, SiO₂ · FeO, SiO₂ · MnO). Включения MnS при температурах горячей обработки давлением пластичны, вытягиваются при горячей деформации, обуславливая анизотропию механических свойств и снижение свойств на поперечных образцах. Силикаты при низких температурах хрупкие, при высоких (горячая прокатка,ковка) – пластичные.

Другим важным фактором, определяющим качество стали, является содержание примесей. Примесями называют химические элементы, перешедшие в состав стали в процессе ее производства как технологические добавки или как составляющие шихтовых материалов. Их содержание обычно ограничивается следующими пределами: $Mn \leq 0,8 \%$, каждого из элементов: $Si, Cr, Ni, Cu \leq 0,3 \%$, $Mo \leq 0,1 \%$, $W \leq 0,2 \%$, $P \leq 0,025 \dots 0,04 \%$, $S \leq 0,015 \dots 0,05 \%$. В литейных марках в качестве примесей может содержаться большая концентрация указанных элементов: $Mn \leq 0,9 \%$, $Si \leq 0,5 \%$, $S \leq 0,06 \%$ и $P \leq 0,08 \%$.

Отнесение химических элементов к примесям или легирующим элементам зависит от их количества и роли в стали. Как правило, для примесей в марочном химическом составе устанавливается верхний (не более) предел содержания. Исключение – постоянные примеси (марганец и кремний), количество которых регламентируется верхним и нижним пределами и для примесей, и для легирующих элементов.

Примеси подразделяют на постоянные, случайные и вредные.

Постоянные примеси попадают в сталь в процессе выплавки из руды и шихтовых материалов. Чаще всего это марганец и кремний, которые имеются практически во всех промышленных сталях.

Марганец – это технологическая добавка, которую вводят в сталь для раскисления и для устранения вредного влияния серы. Марганец частично растворен в феррите и частично в цементите, где он замещает атомы железа. Примесь марганца несколько повышает прочность стали.

Кремний также вводят в сталь для раскисления. Он входит в твердый раствор в феррите, значительно повышая предел текучести стали и снижая способность ее к глубокой вытяжке при холодной штамповке.

Случайными примесями в стали могут быть практически любые элементы, случайно попавшие в сталь из скрапа, природно-легирующей руды или раскислителей. Чаще всего это $Cr, Ni, Cu, Mo, W, Al, Ti$ и др.

Вредными примесями в стали являются сера, фосфор, мышьяк, водород, азот и кислород.

Сера практически нерастворима в аустените. Она образует сульфид железа FeS , входящий в легкоплавкую эвтектику $\gamma + FeS$, или тугоплавкий сульфид марганца MnS .

Фосфор ($0,025 \dots 0,04 \%$) полностью растворен в феррите. Это очень вредная примесь, так как даже сотые доли процента его содержания усиливают хладноломкость, смещая сериальную кривую

ударной вязкости вправо, т.е. повышая температуру перехода из вязкого состояния в хрупкое.

Все газовые примеси в той или иной степени растворимы в феррите.

При превышении предела растворимости в α -железе водород выделяется из феррита в молекулярной форме и способствует зарождению и росту под действием внутренних напряжений флокенов – тончайших трещин, выявляемых в изломе в виде округлых пятен серебристого цвета.

Азот может быть связан в нитриды, например AlN (алюминий вводят в ковш перед разливкой для получения наследственно-мелкозернистой стали).

Кислород практически полностью связан в оксиды FeO , SiO_2 , Al_2O_3 . Хрупкие оксиды ухудшают механические свойства стали.

1.2. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали. Классификация и маркировка сталей

Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали.

Углеродистые стали не содержат специально введенных легирующих элементов. В состав легированных сталей специально введены легирующие элементы, обеспечивающие при определенных способах производства и обработки требуемую структуру и свойства. В легированных сталях содержание отдельных элементов больше, чем этих же элементов в виде примесей.

Легирующие элементы – химические элементы, специально вводимые в сталь для получения требуемой структуры, а также физико-химических и механических свойств.

Основными легирующими элементами в сталях являются: алюминий, кремний, титан, ванадий, хром, марганец, кобальт, никель, ниобий, молибден, вольфрам. Реже используют бор, азот, серу, кальций, селен, теллур, цирконий, тантал, свинец и некоторые другие редкоземельные металлы. Легирующие элементы в стали так или иначе взаимодействуют с железом, углеродом и между собой.

Большинство легирующих элементов образуют с железом твердые растворы замещения, т.е. легированный феррит, имеющий объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК), или легированный аустенит, имеющий гранцентрированную кубическую решетку (ГЦК). Свинец и кальций практически нерастворимы в железе. Легирующие элементы, растворяясь в железе, влияют на температуру его полиморфных превращений.

По характеру влияния их можно разделить на две группы: элементы, расширяющие γ -область (γ -стабилизаторы – марганец, никель, кобальт, медь, азот), и элементы, сужающие γ -область (α -стабилизаторы – алюминий, кремний, хром, молибден, вольфрам, ванадий, ниобий, титан и др.).

Многие легирующие элементы при значительном содержании их в стали образуют с железом или друг с другом различные интерметаллические соединения, имеющие кристаллические решетки, отличные от решеток компонентов. Интерметаллиды обладают различными свойствами, но всем им присуща высокая прочность и, как правило, хрупкость.

По отношению к углероду легирующие элементы делят на некарбидообразующие (Al, Si, Co, Ni, Cu, Pb), практически полностью растворенные в феррите, аустените или мартенсите, и карбидообразующие, которые по их сродству с углеродом, прочности и стойкости карбидов и устойчивости их к распаду можно расположить следующим образом в порядке убывания перечисленных свойств: Hf, Zr, Ti, Ta, Nb, V, W, Mo, Cr, Mn, Fe.

Стойкость карбидов изменяется при изменении их состава вследствие взаимного растворения друг в друге или растворения в них тех или иных элементов (стойкость повышается при растворении в карбиде металла, образующего более устойчивые карбиды).

Элементы, обладающие средней карбидообразующей способностью (Cr, Mo, W), при небольших концентрациях растворяются в цементите, образуя легированный цементит $(FeMe)_3C$ или Me_3C . При достаточно высоких концентрациях этих элементов в стали образуются специальные карбиды, имеющие отличную от цементита решетку.

Сильные карбидообразующие элементы (V, Nb, Ti, Zr) в цементите практически не растворяются и уже при малых содержаниях в стали образуют собственные специальные карбиды или карбонитриды (TiC, VC, VCN и др.).

Почти все легирующие элементы, за исключением марганца и кремния, тормозят рост аустенитного зерна и уменьшают склонность стали к перегреву, что связано с образованием труднорастворимых в аустените карбидов, нитридов и других фаз, служащих барьерами для растущих зерен. Такие активные карбидообразователи, как титан, цирконий, ванадий, сильнее тормозят рост зерна, чем хром, вольфрам и молибден, так как карбиды первых легирующих элементов более устойчивы и труднее растворяются в аустените. Некоторые карбиды (например, TiC, ZrC) остаются нерастворенными в аустените даже при нагреве стали выше 1200 °С.