



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

1. Марганец (до 1,5 %)

Применение

- наиболее широко распространенный в природе легирующий элемент;
- для раскисления и десульфурации высококачественных сталей.

Влияние:

- увеличивает упрочнение твердого раствора и замедляет разупрочнение при отпуске;
- увеличивает устойчивость переохлажденного аустенита и повышает прокаливаемость стали (1% марганца действует аналогично 4% никеля);
- σ_B повышается до содержания 2%Mn; $\sigma_{0,2}$ - повышается только до 1,5% Mn;
- для получения $\sigma_{0,2} \geq 450 \text{ Н/мм}^2$ в нормализованной стали $\Sigma (\%C + \%Mn)/10 = 0,27-0,29$;
- ударная вязкость снижается при увеличении % Mn (особенно при Mn > 1,5%);
- уменьшает вредное влияние серы;
- приводит к измельчению зерна феррита и увеличению доли упрочняющей фазы (в низкоуглеродистых низколегированных сталях с 2% Mn доля упрочняющей фазы $\leq 40\%$)
- при концентрации Mn > 1,7% образуется бейнита и островковый мартенсита;

Недостаток:

- увеличивать рост аустенитного зерна при нагреве до высоких температур



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

2. Кремний (до 2 %)

Применение

- широко распространенный в природе легирующий элемент
- раскислитель (в виде ферросилиция)

Влияние:

- повышает температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ перестройки решетки Fe (стабилизирует феррит);
- упрочняет феррит, повышает $\sigma_{\text{упр}}$;
- задерживает разупрочнение стали при отпуске;
- придает сталям жаропрочность и антикоррозионные свойства; увеличивает электросопротивление;
- 0,15 - 0,35% Si способствует образованию крупнозернистого полигонального феррита;
- способствует уменьшению растворимости карбонитридов Nb(C,N), что способствует их выделению в аустените и снижению за счет этого прочности при повышении T_{хл};

Недостатки:

- снижение пластичности сталей;
- резко способствует отпускной хрупкости второго рода;
- образование неметаллических включений, снижающую усталостную прочность;
- повышенная склонность к обезуглероживанию, ускорение перестаривания и т.д.



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. ИОСИФОВА

Влияние легирующих элементов

3. Никель (до 5 %)

Применение

- легирующий элемент при производстве высококачественных сталей

Влияние:

- расширяет область γ -железа, повышает A_4 и снижает A_3 ;
- до 0,9% Ni – Ф+П структура, а с повышением концентрации – появляется Б;
- повышает пластичность и прочность сталей, не снижая ударную вязкость сталей;
- повышает прокаливаемость стали и снижает $T_{хл}$;
- при содержании Ni >2% резко снижается температуры M_n , (что ухудшает свариваемость), повышает количество Аост, снижается твердость закаленной стали;
- в низкоуглеродистых сталях измельчает зерно феррита и увеличивает долю упрочняющей фазы, повышает прочность;
- при содержании Ni >0,5-0,6% уменьшает ударную вязкость (особенно при замене П на Б + островки А при наличии разнотернистого аустенита в конце прокатки или при аустенитизации; при мелкозернистом бейните снижения ударной вязкости не происходит);

Недостаток:

- при совместном легировании с Cr способствует развитию отпускной хрупкости



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

4. Хром (до 2 %)

Применение

- наиболее дешевый и эффективный карбидообразующий легирующий элемент, с увеличением соотношения $Cr/C : Fe_3C \rightarrow (Fe,Cr)_3C, \rightarrow (Cr,Fe)_7C_3$ или $(Cr,Fe)_{23}C_6$

Влияние:

- увеличивает упрочнение твердого раствора и снижает разупрочнение при отпуске;
- повышает прочность и пластичность конструкционных сталей;
- уменьшает склонность стали к перегреву;
- снижает критическую скорость закалки, увеличивает прокаливаемость;
- при концентрации $> 12\%$ придает окалиностойкость и антикоррозионные свойства;
- повышает износостойкость высокоуглеродистых сталей благодаря карбидам хрома.

Недостаток:

- при повышении концентрации $Cr > 0,7\%$ ухудшается вязкость и повышается $T_{хл}$;
- способствует сегрегации примеси P, Sn, Sb и As к границам зерен и отпускной хрупкости;
- при концентрации $Cr > 5-10\%$ резко ухудшается карбидная однородность материала, что сопровождается снижением пластичности стали, растрескиванием при ковке с большими степенями деформации, увеличением количество концентраторов напряжений, что негативно влияет на стойкость к динамическим нагрузкам.



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

5. Молибден (до 0,2-0,4 %)

Применение:

- сильный карбидо- и нитридообразующий легирующий элемент

Влияние:

- частично растворяется в феррите, упрочняя его (0,2 % Мо равноценны 0,04 % V);
- повышает температуру повышает A_3 и снижает A_4 (стабилизирует феррит);
- незначительно увеличивает прочность, но снижает ударную вязкость;
- подавляет перлитное превращение, способствует образованию участков бейнита или мартенсита за счет стабилизации высокоуглеродистого аустенита в конце $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения;
- при 0,2-0,4 % Мо снижается разупрочнение при отпуске и подавляется отпускная хрупкость;
- измельчает зерно, повышают упрочняемость сталей термической обработкой, увеличивают усталостную прочность сталей;
- при содержании Мо > 0,5% повышается $\sigma_{0,2}$ и снижаются усилия деформирования при холодной или теплой схеме формообразования стали;
- задерживает выделение карбидов V и Nb и делает их более мелкими;
- Мо и Си при нормализации задерживают выделений частиц карбонитридов, что понижает $\sigma_{0,2}$; поэтому $\sigma_{0,2}$ повышают за счет дисперсионного твердения при отпуске;

Недостаток:

- отрицательно сказывается на вязких свойствах нормализованных сталей;
- несколько ухудшает свариваемость



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

6. Вольфрам (до 0,8-1,2 %)

Применение:

- эффективный карбидообразующий элемент

Влияние:

- растворяется в феррите, незначительно увеличивая прочность, но, снижая ударную вязкость, повышает температуру $T_{кл}$ (при концентрации $> 1\%$);
- повышает прокаливаемость и отпускную стойкость;
- способствует измельчению зерна за счет образования высокодисперсных карбидов, служащих центрами кристаллизации;
- измельчает зерно аустенита, уменьшает склонность сталей к перегреву;
- оказывают благоприятное влияние на механические свойства сварных швов низкоуглеродистой стали: прочность их повышается без ущерба для пластичности (аналогично V);
- придает красностойкость инструментальным сталям после термической обработки;

Недостатки:

- большего количество W увеличивает опасность появления труднорастворимых, плохо управляемых карбидов, способствующих охрупчиванию;
- повышает склонность сталей к обезуглероживанию;
- дорогой и дефицитный металл



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

7. Ванадий (до 0,3 %)

Применение:

- сильный карбидо- и нитридообразующий легирующий элемент

Влияние:

- повышает температуру повышает A_3 и снижает A_4 (стабилизирует феррит);
- способствует измельчению зерна за счет образования высокодисперсных карбидов;
- увеличивает скорость зарождения феррита, задерживает перлитное превращение;
- за счет увеличения устойчивости аустенита снижает температуру Бн и Мн;
- замедляет рост аустенитных зерен при нагреве до ~ 950 °С; совместное легирование стали V+Nb сдерживает рост зерна при нагреве до 1050 °С;
- незначительно увеличивает прочность, но снижет ударную вязкость (при концентрации до 1%);
- повышает прокаливаемость и отпускную стойкость;
- при содержании V до 0,07% $\sigma_{0,2}$ увеличивается (0,01% V \sim на 6 Н/мм²); при V > 0,15% (без Mo) $\sigma_{0,2}$ снижается.

Недостаток:

- большего количество V увеличивает опасность появления труднорастворимых карбидов, располагающихся по границам зерен, способствующих охрупчиванию;
- незначительно ухудшает свариваемость



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

7. Ванадий (продолжение)

Влияние: особенности выделения карбидов и карбонитридов ванадия

- Мо и Си задерживают выделений частиц карбонитридов ванадия при охлаждении, поэтому в таких сталях после нормализации для дисперсионного твердения необходимо проводить дополнительный отпуск;
- карбонитриды ванадия начинают выделяться при охлаждении примерно с 1180 °С, поэтому при замедленном охлаждении в высокотемпературной области происходит образование и коагуляция частиц, которые в дальнейшем уже не участвуют в дисперсионном твердении;
- с целью предотвращения выпадения частиц ванадия из аустенита в высокотемпературной области могут вводиться Ti, Al, Nb, которые связывают азот в высокотемпературной области и препятствуют образованию карбонитридов ванадия, позволяя им выделиться ему в феррите при температуре ~ 650 °С;
- увеличение содержания ванадия с 0,4 до 0,8 % усиливает дисперсионное твердение при отпуске и улучшает теплостойкость, но снижает вязкость



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

8. Титан (до 0,1 %)

Применение:

- как сильный карбидо- и нитридообразующий легирующий элемент;
- как хороший раскислитель

Влияние:

- образует тугоплавких нитридов, которые сдерживают рост аустенитного зерна;
- температура полного растворения карбидов и нитридов в стали (0,05% Ti - 0,05% C) – температура 1050 °C, (0,5% Ti - 0,5% C) – полного растворения карбида нет;
- способствует измельчению зерна за счет образования высокодисперсных карбидов;
- повышает прокаливаемость; снижает отпускную хрупкость, вызываемую Sb и P;
- оказывает *облагораживающее* действие на сталь: удаление из нее кислорода, оксидов железа и марганца, азота, шлаковых включений; предупреждение сегрегации вредных примесей; достижение полного восстановления, остатки C, P и S распределяются более равномерно и тонкодисперсно;
- существенно повышает критические напряжения сульфидного растрескивания

Недостаток:

- подкорковая пористость в слитках, что приводит к большим потерям металла при обдирке металла



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

8. Титан (до 0,1 %)

Применение:

- как сильный карбидо- и нитридообразующий легирующий элемент;
- как хороший раскислитель

Влияние:

- образует тугоплавких нитридов, которые сдерживают рост аустенитного зерна;
- температура полного растворения карбидов и нитридов в стали (0,05% Ti - 0,05% C) – температура 1050 °C, (0,5% Ti - 0,5% C) – полного растворения карбида нет;
- способствует измельчению зерна за счет образования высокодисперсных карбидов;
- повышает прокаливаемость; снижает отпускную хрупкость, вызываемую Sb и P;
- оказывает *благораживающее* действие на сталь: удаление из нее кислорода, оксидов железа и марганца, азота, шлаковых включений; предупреждение сегрегации вредных примесей; достижение полного восстановления Fe, более равномерного распределения P и S и большей дисперсности включений;
- существенно повышает критические напряжения сульфидного растрескивания

Недостаток:

- подкорковая пористость в слитках, что приводит к большим потерям металла при обдирке металла



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

9. Ниобий (до ~1 %)

Применение:

- как сильный карбидо- и нитридообразующий легирующий элемент;
- как хороший раскислитель

Влияние:

- образует карбонитриды в высокотемпературной области, начиная примерно с 1250 °С (при охлаждении) и с температур примерно 850 °С (при нагреве);
- полное растворение карбонитридов ниобия при нагреве происходит при температурах 1150 - 1200 °С;
- образуя один из самых тугоплавких нитридов, сдерживает рост аустенитного зерна при нагревах металла до 1050°С; интенсивный рост зерна в сталях с ниобием начинается при нагреве металла до 1150 °С ;
- является одним из самых эффективных упрочнителей твердого раствора;
- задерживает выделение полигонального феррита, но не препятствует росту ферритных зерен;
- **основной эффект:** образованию более мелкозернистой микроструктуры, что связано с задержкой рекристаллизации под влиянием растворенного ниобия и выделением Nb(C,N) в процессе горячей прокатки

Недостаток:

- разложение нитридов Nb при сварке с выделением азота в матрицу



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

10. Алюминий ($\geq 0,002\%$ до $\sim 1\%$)

Применение:

- сильный нитридообразующий легирующий элемент;
- хороший раскислитель

Влияние:

- растворяется в феррите, повышает температуру перестройки решетки Fe (стабилизирует феррит);
- образует тугоплавкие мелкие частицы Al_2O_3 и AlN, выступающие в роли центров кристаллизации зерен, что способствует измельчению зерен, повышению пластичности, снижению температуры вязко-хрупкого перехода (до $0,1\%$ Al) и повышению износостойкости при азотировании поверхностного слоя;
- увеличивает стойкость сталей к окалинообразованию, т.е. сопротивление окислению при высоких температурах;
- при содержании $0,02-0,7\%$ делает низкоуглеродистую сталь нестареющей, выводя азот из твердого раствора, связав его в нитриды;

Недостаток:

- образование оксидов алюминия Al_2O_3 , являющихся концентраторами напряжений при последующей переработке в метизном производстве
- повышение концентрации алюминия ухудшает качество поверхности холоднокатаных полос



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

11. Бор (0,003-0,009 %)

Применение:

- один из самых эффективных легирующих элементов по способности воздействия на уровень механических свойств стали при минимальном расходе

Влияние:

- повышает точку A_{c3} , и чем ниже содержание углерода, тем сильнее влияние бора (на положение A_{c1} не влияет)

на кристаллизацию:

- увеличивает скорость зарождения центров кристаллизации, уменьшает степень переохлаждения стали и повышает скорость ее затвердевания, что особенно важно при повышении производительности непрерывной разливки;
- введение до 0,1% В резко снижает поверхностное натяжение, приводит к адсорбции бора на границах растущих зерен, замедлению линейной скорости роста кристаллов и к измельчению структуры;
- увеличение концентрации $> 0,1\%$ В вызывает образование бористой составляющей эвтектического характера и охрупчивание;
- увеличивает жидкотекучесть и уменьшает за счет этого осевую пористость слитка;
- способствует перераспределению вредных примесей в стали;
- подавляет ликвацию серы;



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

11. Бор (продолжение)

Влияние на прокаливаемость:

- являясь ПАВ (горофильным) элементом, сосредоточивается в дефектных местах по границам зерен;
- имея больший атомный радиус по сравнению с углеродом, уменьшает искаженность кристаллической решетки и снижает вероятность зарождения возникновения зародышей феррита при переохлаждении аустенита;
- увеличивается устойчивость переохлажденного аустенита и прокаливаемость;
- повышение содержания углерода оказывает нейтрализующее влияние на прокаливаемость, что обусловлено образованием карбидов бора и карбоборидов:
 - устраняется эффект бора как ПАВ,
 - повышаются искажения решетки,
 - проявляется зародышевое действие выделяющихся по границам зерен частиц мелкодисперсной боридной фазы;
- **коэффициент усиления прокаливаемости** сталей (F_v) под влиянием бора может быть выражен уравнением **$F_v = 1 + 1,5 (0,9 - \%C)$** ;

Примеры: 0,001-0,0025%B эквивалентно 1,33%Ni + 0,31%Cr + 0,04%Mo

Недостатки:

- усложняет технологию;
- не улучшает пластичности и вязкости, а также технологических свойств



МГТУ

МАГНИТОГОРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г. И. НОСОВА

Влияние легирующих элементов

12. Медь ($\leq 0,4\%$)

Применение:

- целесообразно при комплексном легировании

Влияние:

- повышает устойчивость аустенита, увеличивает прокаливаемость (как аналогичное количество Ni) и закаливаемость стали;
- задерживает разупрочнение при отпуске;
- увеличивает усталостную прочность стали при содержании до 1,3%;
- повышает коррозионную стойкость сталей;
- увеличение концентрации до 0,6% Cu повышает σ_B , $\sigma_{0,2}$, ударная вязкость уменьшается, особенно резко при содержании Cu $> 0,3\%$

Недостатки:

- растрескивание при нагреве до температур 1100 - 1150⁰С и краснеломкость

13. Азот (от 0,008 до 0,001%)

Применение:

- целесообразно при комплексном легировании

Влияние:

- измельчает зерно аустенита за счет образования Nb(C,N), Ti(C,N), V(C,N) или AlN;

Недостатки:

- охрупчивание в результате старения, поэтому N связывают добавками нитридообразующих элементов