

05.16.01

4-493

V

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

Черногорова Ольга Павловна

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ МАРТЕНСИТА ПРИ
ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВАХ С РАЗЛИЧНОЙ КИНЕТИКОЙ
МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Специальность 05.16.01.-

"Металловедение и термическая обработка
металлов"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1978

Читальный зал
«Профессорский»

Работа выполнена на кафедре металловедения Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научные руководители: профессор, доктор технических наук
ШТЕЙНБЕРГ М.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ГРАЧЕВ С.В.,
кандидат технических наук МИНЦ И.И.

Ведущее предприятие - институт Металлофизики ЦНИИЧМ им.
Бардина, г.Москва

Защита состоится "___" _____ 1978 г. в ___ час. в
ауд. ___ на заседании Специализированного совета К-597/3 по
присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челя-
бинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "___" _____ 1978 г.

Ученый секретарь Специализированного
совета, доцент, канд. техн. наук

О.К.Токовой (О.К.Токовой)
5.10.78.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ. Современная техника потребляет огромное число различных материалов с разнообразнейшими физико-механическими свойствами. Важную роль в машиностроении играют материалы с аустенитной структурой - жаропрочные, коррозионностойкие, немагнитные и другие. В последнее время возрастает интерес к сталям и сплавам с метастабильным аустенитом, способным превращаться в мартенсит при достаточно глубоком охлаждении, упругой или пластической деформации. Разработаны так называемые TRIP-стали (ПНП), обладающие уникальным сочетанием высокой прочности и пластичности, обусловленной $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращением при деформировании. Вместе с тем, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению превращения метастабильного аустенита в мартенсит при деформировании, некоторые аспекты этой проблемы нуждаются в дальнейшем исследовании. Закономерности образования мартенсита подробно изучали при растяжении и совершенно недостаточно - при других видах деформирования. Недостаточно ясны особенности формирования структуры и механических свойств при деформировании сталей и сплавов с метастабильным аустенитом, превращающимся в мартенсит при охлаждении по различной кинетике (изотермической или атермической).

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Исследование закономерностей мартенситного превращения в сплавах как с изотермической, так и с атермической его кинетикой при различных видах нагружения: растяжении, кручении, двухосном растяжении. Особое внимание уделено роли упругих напряжений в инициировании мартенситного превращения, что необходимо для выяснения характера влияния мартенситообразования под нагруз-

кой на предел текучести метастабильных аустенитных сплавов. Важной задачей также явилось исследование влияния мартенситного превращения на пластичность при различных схемах напряженного состояния и установление возможности применения данных об условиях реализации повышенной пластичности, полученных при растяжении, для использования их при других способах деформации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ была усовершенствована с целью одновременной осциллографической регистрации процессов деформации (с помощью тензодатчиков) и мартенситного превращения в деформируемом материале с помощью магнитометра, измерительная катушка которого надевалась непосредственно на образец.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Исследовано образование мартенсита при различных видах деформации на одних и тех же материалах. Рассмотрены закономерности мартенситного превращения в сплавах с различной его кинетикой, протекающего под действием упругих напряжений, и установлен характер влияния этого процесса на предел текучести. Исследована взаимосвязь пластичности метастабильных аустенитных сплавов с кинетико-морфологическими особенностями превращения при разных способах нагружения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Результаты работы позволяют более обоснованно подходить к назначению температурных режимов деформации метастабильных аустенитных материалов.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы диссертации доложены и обсуждены на областных научно-технических конференциях, на областных конференциях молодых специалистов, на научных семинарах ИМФ ЦНИИЧМ (г. Москва), института атомной энергии им. Курчатова (г. Москва), на

заседании Ученого Совета ЦЗЛ Новосибирского металлургического завода им. Кузнецова.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация изложена на 93 страницах машинописного текста и состоит из введения, 6 глав и заключения. Диссертация содержит 106 рисунков и список литературы из 90 наименований.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были выбраны сплавы на железной основе с высоким содержанием Ni , претерпевающие как изотермическое ($H25X2,2$, $H25X2,6$, $H26X3$, $H23Г1,8$, $H23Г2,6$, $H27X2E1$, $H29$), так и варвное ($24H27$, $H32$) мартенситное превращение. Исследованы также сплавы $40H15X2$ и $H26M5$, обладающие двойственной кинетикой превращения. Сплавы были выплавлены в индукционной печи и разлиты в слитки массой 15 кг. Шихтовыми материалами служили железо М1-0, графит, электролитический никель, металлические хром, марганец, молибден, ниобий. Слитки были гомогенизированы при $1200^{\circ}C$ (16 ч.), затем прокованы на заготовки 70×70 мм для образцов на двухосное растяжение и 14×14 мм для всех остальных образцов. В работе использованы металлографический, электронномикроскопический, магнитометрический, дилатометрический, тензOMETрический методы исследования. Механические испытания проводились на стандартных испытательных машинах, дополненных тензOMETрической и магнитометрической аппаратурой для одновременной регистрации процессов деформирования и мартенситного превращения при нагружении.

МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ

Наибольшее количество мартенсита образуется при кручении, поскольку в этом случае достигаются максимальные степени деформации. В силу этой же причины образование мартенсита при кручении может происходить при более высоких температурах, чем при одноосном и двухосном растяжении. Однако для сравнения способности равных методов нагружения вызывать мартенситное превращение необходимо либо оценивать количество мартенсита при равных степенях деформации, либо сравнивать дифференциальные характеристики, например, среднюю интенсивность мартенситного превращения. Такая оценка позволила установить, что в сплавах H27X2b1 и H29 интенсивность превращения при двухосном растяжении в среднем в два раза, а в сплаве 40H15X2 в восемь раз, выше, чем при одноосном растяжении.

Исследование превращения при кручении затруднено тем, что мартенсит по сечению цилиндрического образца распределен неравномерно, что, в свою очередь, обусловлено неравномерностью распределения деформации: она максимальна на поверхности образца и в центре равна нулю. Таким образом, непосредственно в процессе кручения регистрируется среднее количество мартенсита в образце. Для выяснения количественной связи между деформацией в данной точке образца и степенью превращения, вызванного этой деформацией, методом послойного травления находилось распределение мартенсита по сечению образца. Для сопоставления превращения при растяжении и кручении деформация в обоих случаях выражалась в одинаковых единицах, отражающих наибольший истинный сдвиг γ_{max} .

Интенсивность мартенситного превращения при температурах кру-

чения, ненамного превышающих M_s , может быть выше (сплав H27X2E1), примерно равна (сплавы H26M5, 40H15A2), либо ниже (сплав 10H28), чем при одноосном растяжении. Для всех исследованных сплавов общая тенденция: по мере повышения температуры испытания полнота превращения при кручении в области малых деформаций, сопоставимых с деформациями при одноосном растяжении, ослабевает в большей степени, чем при растяжении, и при температурах выше M_s на 40–50°С превращение при кручении начинается после значительно большей деформации, чем при растяжении.

При описании морфологии образующегося при деформации мартенсита целесообразно выделить 2 температурных интервала: первый – "низкотемпературный" (M_s – M_s + 70–120°С), в котором превращение инициируется всеми исследованными способами деформации, и второй – "высокотемпературный" (M_s +70–120°С+ M_s +250–300°С), при котором превращение регистрируется только при кручении, поскольку, как уже упоминалось, в этом случае возможно значительно большие степени деформации, чем при растяжении. В низкотемпературном интервале при деформации изотермических сплавов образуется мартенсит, идентичный мартенситу охлаждения, отличающийся несколько более нерегулярными, "рваными" очертаниями. При деформации "варьных" сплавов, как уже неоднократно описано в литературе, структура мартенсита в значительной степени зависит от температуры деформации. Чуть выше M_s возникают линейовидные кристаллы, весьма сходные с мартенситом охлаждения, а по мере повышения температуры деформации это сходство постепенно утрачивается и при температурах, превышающих M_s более, чем на 40°С, возникают кристаллы мартенсита и их скопления, напоминающие изотермический мартенсит охлаждения. В высокотемпературном интервале при кручении возника-

ет ферромагнитная фаза, присутствие которой микроскопически обнаруживается по отчетливой травимости полос скольжения. При электронномикроскопическом исследовании участков повышенной травимости было обнаружено наличие α -фазы, частицы которой крайне дисперсны, имеют форму реек и залегают в линиях скольжения аустенита. Подобные результаты были получены в ряде работ, где аналогичная фаза была идентифицирована как тонкодисперсный мартенсит, зарождение которого инициировано процессами пластического течения в аустените.

ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ

К моменту начала данного исследования считалось, что температурная зависимость условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ "варьных" и упрочненных внешним или фазовым наклепом "изотермических" сплавов имеет минимум вблизи M_s , в то время как при испытании ненаклепанных "изотермических" сплавов $\sigma_{0,2}$ монотонно возрастает при понижении температуры относительно мартенситной точки. Падение предела текучести связывалось с образованием мартенсита под действием напряжений, в связи с чем этому вопросу в данной работе уделялось особое внимание.

В сплавах с изотермической кинетикой мартенситного превращения при растяжении выше M_s образование мартенсита начинается в пластической области, т.е. после того как начальный участок диаграммы деформации утрачивает прямолинейный характер и напряжения, соответствующие началу превращения, превышают предел текучести аустенита. При температурах ниже M_s сигнал магнитометра регистрирует образование α -фазы при напряжениях, мень-

них предела текучести аустенита. Превращение активизируется крайне низкими напряжениями и количество мартенсита возрастает пропорционально напряжению. До потери прямолинейности начальным участком диаграммы деформации, обычно принимаемым за упругий, под нагрузкой возникает достаточно большое количество мартенсита (до 12-15%). Чтобы оценить влияние образования мартенсита на предел текучести, проводился следующий эксперимент. Пара образцов "изотермического" сплава охлаждалась до температуры ниже M_s . Один из них растягивался непосредственно при этой температуре, а другой отогревался и растягивался при температуре выше M_s (т.е. при комнатной), когда мартенситное превращение начиналось в процессе пластической деформации и, следовательно, не могло влиять на значение предела текучести. Такие эксперименты показали, что значения предела текучести, определенное как напряжения, соответствующие нарушению прямолинейности начального участка диаграммы деформации, оказывается пониженным в случае испытания ниже M_s , т.е. при образовании мартенсита под действием упругих напряжений. Было также обнаружено, что угол наклона начального линейного участка диаграммы к оси деформации в случае растяжения образцов в мартенситном интервале оказывается значительно меньше, чем при испытании стабильных двухфазных образцов. Это возможно при условии, что для образцов, растягиваемых при температурах ниже M_s и претерпевающих превращение под действием низких напряжений, начальный участок диаграммы деформации не является упругим. Измерения остаточной деформации показали, что в таких случаях измеряемому по диаграмме растяжения условному пределу текучести $\sigma_{0.2}$ может соответство-

вать остаточная деформация, значительно превышающая 0,2% и в некоторых случаях достигающая 1,2%. Установлено, что эта остаточная деформация пропорциональна количеству мартенсита, возникшему под действием напряжений, причем одному проценту мартенсита соответствует относительное удлинение примерно равное 0,08%. Таким образом, для реализации остаточной деформации 0,2%, являющейся допуском для условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, достаточно образования под нагрузкой около 2,5% мартенсита. Значения $\sigma_{0,2}$, измеренные по остаточной деформации образцов, испытанных в мартенситном интервале температур, в ряде случаев оказываются в 2-3 раза ниже определяемых по диаграмме растяжения. В соответствии с этим для сплавов с изотермической кинетикой превращения также обнаружены минимумы на кривых температурной зависимости условного предела текучести $\sigma_{0,2}$. Прямолинейный характер начального участка диаграммы деформации, сохраняющийся несмотря на накопление остаточной деформации, обусловлен тем, что в изотермических сплавах полнота превращения под нагрузкой пропорциональна напряжению. Во "вервных" сплавах превращение под нагрузкой, как и при охлаждении, может протекать вервным путем. В этих случаях осуществляемая превращением деформация не накапливается постепенно как в "изотермических" сплавах, а возникает практически мгновенно, что приводит к резкому падению напряжения и выражается в виде ступенек, зубцов на диаграмме деформации. В тех случаях, когда вервное превращение инициируется напряжениями, меньшими предела текучести стабильного аустенита, линейный характер начального участка диаграммы деформации нарушается, и правильное определение $\sigma_{0,2}$ не вызывает затруднений. Необходимо

отметить, что при температурах ниже M_s на 10-15°C в сплаве 24Н27 вервыи превращения под нагрузкой не наблюдаются и образование мартенсита, как и в изотермических сплавах, начинается при напряжениях, близких к нулю, и протекает с практически постоянной скоростью. В этом случае линейность начального участка диаграммы также не нарушается, несмотря на накопление значительной остаточной деформации. Следовательно, для "вервыиных" сплавов минимумы на кривых температурной зависимости $\sigma_{0,2}$ могут распространяться на значительный интервал температур, а не являться узкими, как это считается в ряде работ.

Установлено, что повышение скорости растяжения от 2 до 50 мм/мин приводит к подавлению превращения под действием напряжений в "изотермических" сплавах (напряжение, инициирующее превращение в сплаве Н23Г1,8 возрастает от 8 до 21 кг/мм²) и практически не оказывает влияния на полноту превращения во "вервыиных" сплавах. Отсюда следует, что для "изотермических" сплавов значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ при температурах испытания ниже M_s зависят от скорости нагружения и при достаточно большой скорости минимумы на кривых температурной зависимости $\sigma_{0,2}$ исчезнут, тогда как для "вервыиных" сплавов значения $\sigma_{0,2}$ не зависят от скорости нагружения.

ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СПЛАВОВ

Мартенситное превращение, протекающее под действием деформации, может приводить к повышению пластичности метастабильных аустенитных сплавов. Это явление неоднократно описано в литературе. В настоящей работе максимумы на кривых температурной зави-

симости относительного удлинения наблюдались как для "изотермических", так и для "взрывных" сплавов при температурах растяжения, превышающих M_s на 40-100°. Установлено, что наибольшее повышение пластичности наблюдается при такой интенсивности мартенситного превращения, когда при возрастании относительного удлинения на 1% в среднем образуется 0,2-0,5% мартенсита.

При кручении мартенситное превращение в процессе деформации также способствует повышению пластичности. Значения относительного угла закручивания γ в широком диапазоне температур, при которых кручение вызывает мартенситное превращение, оказываются выше, чем при температурах, практически исключаяющих его. Максимумы на кривых температурной зависимости пластичности выглядят более пологими, чем при растяжении. Значения относительного прироста пластичности при кручении ненамного превышают соответствующие величины при растяжении, тогда как абсолютный прирост пластичности, введенной превращением, при кручении в 4-8 раз больше, чем при растяжении (при сравнении пластичности деформация при растяжении и кручении выражалась в единицах σ_{max}). Наиболее эффективно пластичность возрастает при температурах, превышающих M_s на 120-250°. В этой температурной области происходит образование тонкодисперсного мартенсита, причем интенсивность превращения крайне мала, она примерно в 50 раз меньше соответствующей величины, характерной для температур максимальной пластичности при растяжении. Таким образом, при разных способах деформации, в данном случае при растяжении и кручении, обнаружены существенные различия в явлении повышения пластичности.

Во-первых, температуры максимальной пластичности при кручении намного выше, чем при растяжении (на 80-150°C) и, во-вторых, при кручении наибольший прирост пластичности обусловлен образованием иного типа мартенсита, причем интенсивность превращения, обеспечивающего повышение пластичности, при кручении значительно ниже. Эти различия, вероятно, связаны с тем, что при кручении и растяжении ведущую роль играют разные факторы, способствующие предупреждению разрушения и, тем самым, повышению пластичности. При растяжении основное значение имеет предотвращение образования шейки, поэтому превращение должно протекать достаточно активно для упрочнения локально деформирующегося сечения. При кручении не происходит потери устойчивости формы образца, следовательно для повышения пластичности наиболее важны релаксация пиковых напряжений и предупреждение распространения трещин. Эти функции более успешно осуществляются с помощью высокотемпературного типа мартенсита, благодаря дисперсности которого превращение, обеспечивающее повышение пластичности, протекает с малой интенсивностью. Таким образом, для использования эффекта пластичности, наведенной превращением, нельзя формально применять результаты испытаний механических свойств на растяжение в тех случаях, когда металл подвергается иным способам деформирования. Условия нагружения и, в частности, степень жесткости напряженного состояния определяют особенности образования мартенсита, обеспечивающие максимальную пластичность при данном методе нагружения. Вследствие этого, температура наивысшей пластичности сплава зависит от способа его деформирования.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано вызванное деформацией мартенситное превращение в метастабильных аустенитных сплавах при различных методах механических испытаний. Превращение регистрировалось непосредственно в процессе деформации, что позволило исследовать и объяснить ряд вопросов, связанных с влиянием образования мартенсита на механическое поведение материала.

2. При двухосном растяжении мартенситное превращение протекает более интенсивно, чем при одноосном растяжении и кручении. Превращение при кручении не всегда протекает менее интенсивно, чем при одноосном растяжении, как это считалось ранее. В некоторых случаях оно может происходить с примерно равной интенсивностью, либо даже с большей при кручении.

3. При кручении обнаружены два принципиально различных типа мартенсита: низкотемпературный ($M_s - M_s + 70 - 120^{\circ}$) мартенсит, идентичный мартенситу охлаждения, и высокотемпературный ($M_s + 70 - 120 + M_s + 250 - 300^{\circ}$), залегающий в следах скольжения аустенита, тонкодисперсный мартенсит, отдельные кристаллы которого неразрешимы при увеличениях оптического микроскопа. При растяжении высокотемпературный мартенсит не обнаружен, что, по-видимому, связано с невозможностью осуществления столь высоких деформаций, как при кручении.

4. Мартенситное превращение под нагрузкой приводит к появлению остаточной деформации, величина которой составляет 0,08% при образовании 1% мартенсита.

5. В мартенситном интервале температур, а во "варивных" сплавах и несколько выше, образование мартенсита происходит под действием упругих напряжений, меньших предела текучести аустенита. Этим обусловлено появление минимумов на кривых температурной зависимости условного предела текучести $\sigma_{0.2}$.

6. В ряде случаев, в частности, при растяжении "изотермических" сплавов осуществляемая превращением деформация может выразиться в уменьшении угла наклона начального участка диаграммы деформации, не нарушая его линейного характера. При этом определение по диаграмме деформации $\sigma_{0.2}$ может приводить к завышению его значений в 2-3 раза и, следовательно, измерение $\sigma_{0.2}$ следует производить по остаточной деформации.

7. Образование мартенсита при деформации приводит к повышению пластичности метастабильных аустенитных сплавов, что выражается в появлении максимумов на кривых температурной зависимости относительного удлинения δ при растяжении и относительного угла закручивания γ при кручении. При растяжении температуры максимумов пластичности для исследованных сплавов превышают M_s на 40-100°C, при кручении - на 120-250°C.

8. Повышение пластичности при кручении обусловлено образованием тонкодисперсного мартенсита, существенно отличающегося от мартенсита, обеспечивающего повышение пластичности при растяжении. Интенсивность превращения при температурах максимумов δ при кручении примерно в 50 раз ниже, чем при температурах максимумов δ при растяжении (при сравнительной оценке деформация выражена в единицах наибольшего истинного сдвига ϱ_{\max}). Таким образом, вид нагружения, в частности, степень жесткости напря-

ленного состояния оказывает значительное влияние на условия реализации максимальной пластичности.

Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:

1. Штейнберг М.М., Туралев Л.Г., Пейсахов Д.Б., Черногорова О.П. Аномальное снижение предела текучести вблизи M_s в метастабильных аустенитных сплавах. Сб. трудов ЧПИ "Вопросы производства и обработки стали" № 177, Челябинск, 1976, стр. 123-125.

2. Мирзаев Д.А., Ульянов В.Г., Черногорова О.П. Об одном механизме сверхпластичности. Сб. трудов ЧПИ "Вопросы производства и обработки стали", № 177, Челябинск, 1976, стр. 129-131.

3. Штейнберг М.М., Туралев Л.Г., Черногорова О.П. Образование мартенсита под нагрузкой и его влияние на механические свойства метастабильных аустенитных сплавов. ФММ, 1977, т.44, вып.1, стр.217-220.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на:

1. XXI, XX, XXXI научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, апрель 1976, 1977, 1978 г.г.

2. У Уральской школе металловедов-термистов "Вопросы металловедения и термической обработки стали и титановых сплавов", 13-18 марта 1977 г.

3. III областной научно-технической конференции молодых специалистов и ученых предприятий и организаций черной металлургии "Повышение эффективности применения черных металлов в народном хозяйстве", ноябрь 1976 г.

4. I научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, февраль 1977 г.

5. Научных семинарах кафедр металловедения ЧПИ, института атомной энергии им. Курчатова, ЦИ Новосибирского металлургического завода им. Кузнецова, 1978 г.