

Деформационный отпуск конструкционной стали

к.т.н. Прохорова А.И., Борисова А.О.
Университет машиностроения, Москва
8-906-0964855, e-mail:kafmaterialy@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты влияния температуры и степени деформации при отпуске стали 38ХНЗМФА. Показано, что деформация при температурах 300 и 500°C значительно повышает характеристики прочности, но снижает пластичность. Последующий последеформационный отпуск при температуре 560°C благоприятно влияет на комплекс механических свойств.

Ключевые слова: структура, пластическая деформация, последеформационный отпуск, дефекты, прочность, мартенсит

Пластическая деформация и наклёп оказывают заметное влияние на механические свойства деталей [1, 2]. К числу наиболее результативных способов воздействия на структуру и свойства металлов относится термомеханическая обработка. В последние годы интенсивно изучается (а в ряде случаев уже применяется в практике промышленного производства) разновидность термомеханической обработки (ТМО), включающая деформацию мартенсита при температурах, не превышающих 500°C.

Преимущество такой обработки заключается в том, что метод может быть использован при упрочнении готовых изделий сложной конфигурации. Исследования, проведенные к настоящему времени, показали, что деформация среднелегированных сталей со структурой мартенсита обеспечивает повышение конструкционной прочности [1,3].

Изменение механических свойств в результате деформации мартенсита связывают с одновременным протеканием процессов разупорядочения углерода в тетрагональном мартенсите, взаимодействия дислокаций с атомами углерода, релаксации локальных напряжений, а также с взаимодействием старых и новых дислокаций. Скорость и полнота развития этих процессов в значительной степени зависит от структуры деформируемого мартенсита, температуры и степени деформации, химического состава стали, а также комбинирования в разной последовательности пластической деформации мартенсита с нагревом [3-5].

В настоящей работе изучались влияние температуры и степени деформации на структуру и свойства промышленной стали 38ХНЗМФА, предварительно закалённой и отпущенной при различных температурах, с целью выработки рекомендаций по рациональному выбору упрочняющей обработки этой стали.

Из прокованных и отожжённых заготовок исследуемой стали изготавливали разрывные образцы согласно ГОСТ 9651-84, которые подвергали закалке от 860°C и последующему отпуску при 300°C ($\tau = 2$ часа). Деформацию отпущенного мартенсита проводили растяжением при температурах 300 и 500°C на универсальной испытательной машине гидравлического действия СД-10, снабжённой трубчатой электрической печью сопротивления. Холодные образцы располагали в центре печи и после 15 минут прогрева растягивали. По данным предварительных испытаний на растяжение были выбраны степени деформации. При температуре 300°C образцы деформировали на 4 и 8 %, а при 500°C – на 2 и 4%. Для половины деформированных образцов проводили последующий (последеформационный) отпуск при температуре 560°C в течение 2 часов. Контрольную обработку недеформированных образцов проводили в идентичных условиях нагрева и охлаждения. Механические свойства определяли при комнатной температуре испытанием на растяжение. Структуру стали исследовали на электронном микроскопе ЭМВ-100А. Определение ширины рентгеновской дифракционной линии $\{110\}\beta$ проводили на дифрактометре ДРОН-1,5 в Cr -излучении.

Пластическая деформация растяжением при температуре 300°C низко отпущенной стали 38ХНЗМФА приводит к увеличению прочности и снижению пластичности по сравнению со сталью недеформированной, но отпущенной при температуре 300°C (рисунок 1).

С увеличением степени деформации до 8 % эффект повышения характеристик прочности ($\sigma_{\text{тц}}$; $\sigma_{0,2}$; $\sigma_{\text{в}}$) и снижения пластичности (δ и φ) больше. Наиболее заметно увеличиваются,

характеристики сопротивления малым пластическим деформациям ($\sigma_{пл}$ и $\sigma_{0,2}$ увеличивается на $\sim 40\%$) а удлинение уменьшается примерно в 2 раза по сравнению с недеформированными образцами. Диаграмма растяжения исследуемой недеформированной стали характеризуется резко выраженной стадией деформационного упрочнения (рисунок 2, кривая 2).

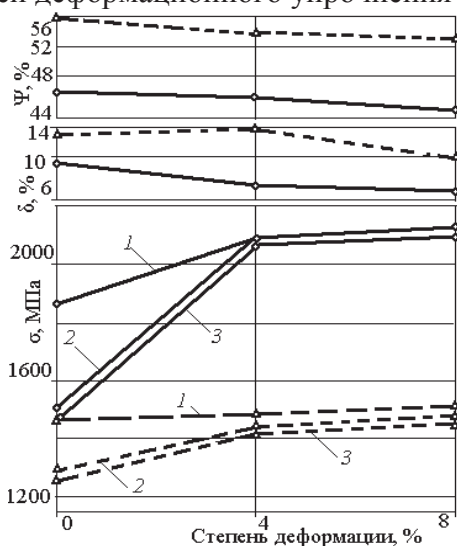


Рисунок 1. Влияние степени деформации растяжением при температуре 300°C на механические свойства стали 38ХНЗМФА: σ_v (1), $\sigma_{0,2}$ (2) и $\sigma_{пл}$ (3) по сравнению с недеформированными образцами; прерывистая линия - без последующего отпуска; сплошная линия - отпуск после деформации 560°C, 2 часа

При этом площадка текучести, т.е. стадия течения стали при приблизительно постоянном напряжении, отсутствует. В ходе же испытаний на растяжение образцов, деформированных при температуре 300°C, стадия деформационного упрочнения отсутствует, после небольшого «течения» наступает разрушение. Значения предела прочности и предела текучести при этом практически совпадают.

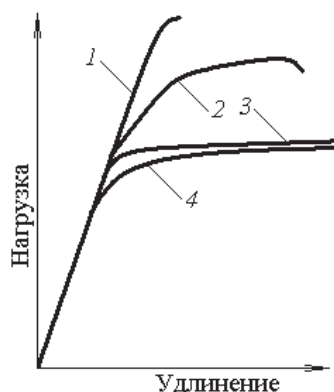


Рисунок 2. Диаграммы растяжения стали 38ХНЗМФА после различных режимов деформационного отпуска: 1 - закалка + растяжение при $t = 300^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 4\%$; 2 - закалка + отпуск при $t = 300^\circ\text{C}$; 3 - закалка + растяжение при $t = 300^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 4\%$ + отпуск при 560°C; 4 - закалка + отпуск при $t = 560^\circ\text{C}$

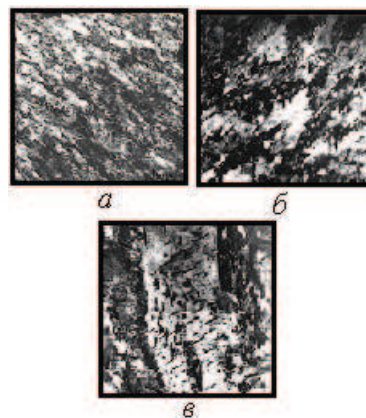


Рисунок 3. Структура стали 38ХНЗМФА после упрочняющих обработок: а - закалка + растяжение при $t = 300^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 4\%$; б - закалка + растяжение при $t = 300^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 4\%$ + отпуск при 560°C; в - закалка + растяжение при $t = 500^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 2\%$

Такое изменение свойств деформированной стали, очевидно, можно связать с тем, что пластическая деформация низкоотпущенного мартенсита увеличивает плотность дефектов кристаллического строения, а именно: наряду с повышением плотности дислокаций увеличивается плотность двойников. Об этом свидетельствуют данные электронно-микроскопического анализа (рисунок 3, а).

Следует отметить, что в недеформированной, закалённой и низкоотпущенной стали двойники отсутствуют, наблюдаются пакеты кристаллов дислокационного мартенсита. Увеличение плотности дефектов кристаллического строения в деформированной стали повышает энергию материала, что служит термодинамическим стимулом различных физико-химических превращений и источником энергии, необходимой для их протекания [3]. Поэтому атомы углерода в деформированной стали могут по наикратчайшим путям мигрировать к дислокациям и сосредотачиваться около них, образуя сегрегации или так называемые «кластеры».

Образование кластеров может приводить, с одной стороны, к увеличению уровня напряжений, а с другой – к уменьшению остаточной тетрагональности решётки мартенсита. Последнее сильнее сказывается на изменении физического уширения, так как ширина рентгеновской дифракционной линии $\{110\}\beta$ деформированной стали уменьшается по сравнению с подобной характеристикой недеформированной стали.

Проведение после деформации мартенсита последующего (последеформационного) отпуска при температуре 560°C существенно влияет на механические свойства деформированной стали. По результатам опытов, приведенных на рисунке 1, видно, что последеформационный отпуск ($t = 560^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ ч) стали 38ХНЗМФА, деформированной при 300°C снижает характеристика прочности и повышает пластичность по сравнению со сталью, деформированной при температуре 300°C , но неотпущенной. Однако значения характеристик прочности стали, деформированной и отпущенной при 560°C , выше, чем стали, обработанной по серийному режиму (закалка от 860°C + отпуск, $t = 560^\circ\text{C}$), а характеристики пластичности при этом одинаковы. Причем характеристики сопротивления малым пластическим деформациям в этом случае значительно выше, чем подобные характеристики стали, обработанной по серийному режиму. Так в результате проведения деформационного отпуска стали при 300°C ; $\varepsilon = 4\%$ между закалкой и высоким отпуском значения $\sigma_{\text{пц}} = 1420$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1450$ МПа; $\sigma_{\text{в}} = 1500$ МПа, в то время как после обработки стали по серийному режиму $\sigma_{\text{пц}} = 1270$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1300$ МПа; $\sigma_{\text{в}} = 1470$ МПа. Из сопоставления диаграмм деформации видно, что проведение последеформационного отпуска сказывается на виде диаграммы растяжения; при испытании образцов с последеформационным отпуском отсутствует стадия деформационного упрочнения, а длина площадки текучести увеличивается (рисунок 2).

Изменение механических свойств стали в результате проведения последеформационного отпуска можно объяснить уменьшением плотности дефектов кристаллического строения в структуре мартенсита, предварительно деформированного при 300°C , образованием большого числа мелкодисперсных карбидов вытянутой формы и выделяющихся в основном по границам мартенситных кристаллов (рисунок 3, б). Все эти изменения в структуре приводят к уменьшению ширины рентгеновской линии $\{110\}\beta$, о чем свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа. Следует отметить также, что в недеформированной стали 38ХНЗМФА после высокого отпуска наблюдается большое количество крупных рекристаллизованных зёрен α -фазы и лишь в отдельных местах сохраняется её пакетное строение. В стали же, деформированной при 300°C и подвергнутой последеформационному высокому отпуску, рекристаллизованных зёрен α -фазы значительно меньше, в основном сохраняется пакетное строение α -фазы. Очевидно, такая структура определяет более высокие значения характеристик сопротивления малым пластическим деформациям.

Аналогичные изменения механических свойств стали 38ХНЗМФА происходят в результате проведения деформационного отпуска при более высокой температуре 500°C . Здесь также наблюдается увеличение прочности и снижение пластичности по сравнению со сталью недеформированной, но отпущенной при 500°C . С увеличением степени деформации до 4% при отпуске стали значения характеристик прочности ($\sigma_{\text{пц}}$; $\sigma_{0,2}$; $\sigma_{\text{в}}$) увеличиваются, относительное удлинение уменьшается, а сужение практически не изменяется в зависимости от степени деформации. В результате деформационного отпуска стали при 500°C особенно сильно повышаются по сравнению с недеформированной сталью предел пропорциональности и предел текучести.

На диаграмме растяжения, полученной при испытании образцов, деформированных при 500°C так же, как и в случае испытания образцов после низкотемпературного деформационного отпуска, отсутствует стадия деформационного упрочнения. Однако в результате испытания образцов после высокотемпературного деформационного отпуска на диаграмме появляется чётко выраженная площадка текучести, что соответствует развитию процессов скольжения и двойникования в ходе растяжения образцов. Следует отметить также, что при одинаковых степенях деформации значения характеристик прочности ниже, а относительное удлинение и сужение выше после высокотемпературного деформационного отпуска по сравнению с подобными характеристиками стали после низкотемпературного деформационного отпуска.

Это, по-видимому, можно объяснить тем, что в процессе деформации стали 38ХНЗМФА при температуре 500°C происходит существенный распад мартенсита с образованием мелкодисперсных карбидов, а плотность дефектов кристаллического строения, в частности плотность двойников, несколько меньше, чем после деформации стали при температуре 300 °C (рисунок 3). Значительное уменьшение тетрагональности α -фазы вследствие выделения углерода при высокотемпературном деформационном отпуске сильно сказывается на уменьшении ширины рентгеновской линии. Величина эквивалентная ширине рентгеновской линии $\{110\}\beta$ после закалки и отпуска при 500°C без приложения нагрузки больше, чем после закалки и деформационного отпуска при 500°C ($\epsilon = 2\%$).

Нагрев стали 38ХНЗМФА на температуру 560°C, $\tau = 2$ ч после высокотемпературного деформационного отпуска приводит, как и в случае нагрева стали после низкотемпературного деформационного отпуска, к снижению характеристик прочности и увеличению пластичности по сравнению с прочностью и пластичностью стали, не подвергнутой последеформационному нагреву. Причём значения механических свойств после такой обработки деформированной стали существенно не зависят от температуры деформационного отпуска. В результате после деформационного отпуска стали, деформированной при 500°C ($\epsilon = 2\%$) значения предела прочности и предела текучести также сохраняются высокими: $\sigma_{\text{пл}} = 1410$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1430$ МПа – что примерно на 15 % больше, чем после серийной обработки образцов (закалка от 860 °C + отпуск, $t = 560^\circ\text{C}$). При этом предел прочности, удлинение и сужение стали практически не изменяются по сравнению с подобными характеристиками стали, обработанной по серийному режиму. Следует отметить также, что после отпуска при 560°C образцов, деформированных с большей степенью растяжения ($\epsilon = 4\%$) значения характеристик пластичности несколько снижаются по сравнению с пластичностью стали после обработки по серийному режиму.

Диаграмма растяжения стали, деформированной при 500°C и затем отпущенной при 560 °C характеризуется наличием протяжённой площадки текучести, стадия же деформационного упрочнения также отсутствует, как и в случае испытания на растяжение образцов, деформированных при 300°C и затем отпущенных при этой же температуре 560°C.

Структура стали, деформированной при 500°C и подвергнутой последеформационному высокому отпуску существенно не отличается от структуры стали, деформированной при более низкой температуре 300 °C и затем отпущенной при 560°C. Здесь также наблюдаются карбиды и в основном пакетное строение α -фазы. В результате проведения последеформационного отпуска стали, деформированной при 500°C, особенно с большими степенями деформации, плотность дефектов кристаллического строения уменьшается, о чём свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа.

Таким образом, деформационный отпуск стали 38ХНЗМФА как при низких, так и при высоких температурах (300 и 500°C) значительно повышает характеристики прочности, особенно сильно увеличиваются предел текучести и предел пропорциональности, но снижаются характеристики пластичности. С уменьшением температуры и увеличением степени деформации стали при отпуске эффект повышения прочности и снижения пластичности возрастает. Последующий высокий отпуск деформированной стали при $t = 560^\circ\text{C}$ благоприятно влияет на комплекс её механических свойств. Значения относительного удлинения и сужения до-

стигают значений соответствующих характеристик стали, обработанной по серийному режиму (закалка от 860°C + отпуск при $t = 560^\circ\text{C}$). При этом характеристики сопротивления малым пластическим деформациям ($\sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{0,2}$) примерно на 15% выше, чем после обработки стали по серийной технологии.

Анализ электронно-микроскопических исследований показывает, что в стали 38ХНЗМФА, подвергнутой деформационному отпуску при последующем нагреве до высоких температур отпуска сохраняется в основном пакетное строение α -фазы с мелкодисперсными выделениями карбидов вытянутой формы. В то время как после серийной обработки, наблюдается большое количество участков рекристаллизованной α -фазы.

Литература

1. Металловедение и термическая обработка стали. В 3 т. – М. Т. 2 / Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г.: Металлургия, 1983 - 368 с.
2. Современные направления стабилизации прочности и долговечности в машиностроительной продукции / Зинченко В.М., Маневский С.Е., Прохорова А.И.: Технология металлов, 2012. № 10 - с. 12 – 18.
3. Деформационное упрочнение закаленных конструкционных сталей / Васильева А.Г.: М. Машиностроение, 1981 – 232 с.
4. Перераспределение углерода при деформации закаленной конструкционной стали / Корнет Е.В., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Громов В.Е.: Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. № 1 - с. 101 – 105.
5. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения / Иванов Ю.Ф., Корнет Е.В., Громов В.Е.: Новокузнецк. Изд-во СибГИУ, 2010 – 173 с.

Производство и переработка современных композитных материалов

Хашем Манафи Шейдан,

Университет машиностроения

8(925) 877-11-64, hashemmanafi@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена современным композитным материалам. В статье содержится информация о различных технологиях их производства, а так же о механической и термической переработки композитных материалов.

Ключевые слова: композиты, углеродное волокно, препрег, переработка композитов

Современные композитные материалы используются для создания многих конструктивных деталей в инженерных работах. Главная причина - это их привлекательные характеристики, такие как: легкий вес, высокая прочность, высокая жесткость, хорошее сопротивление усталости, а также высокая коррозионная стойкость, при этом изготовление деталей со сложной геометрией при использовании меньшего количества компонентов дает возможность производителям снизить стоимость детали по сравнению с другими аналогами создаваемыми из металлов. Прежде чем перейти к главным аспектам изготовления и разных технологиях использующиеся для производства композитов, уместно рассказать о конструктивных композитных изделиях, которые были изготовлены по этим методам.

Композитные изделия производятся посредством различных технологий. Наилучший процесс производства для конкретного изделия зависит от выбранного типа волокна и типа матрицы, требований по качеству а также от формы изделия. Все эти факторы должны учитываться в начале процесса разработки деталей или конструкций.

Особенностью практически всех производственных процессов является то, что в конечном результате изделие состоит из слоев. Толщина каждого слоя, как правило, колеблется от 0,125 мм (0,005") для препрегов аэрокосмической отрасли до нескольких миллиметров для рулонных тканей (примерно 0,25"). Это значит, что изделия обычно состоят из большого количества слоев, которые направлены по разным углам для получения необходимых свойств конструкции.