

После кристаллизации наплавов микроструктура представляет собой первичные дендриты мартенсита и остаточный аустенит, сохранившийся в междендритных прослойках. Наблюдается тенденция к увеличению разветвления первичных дендритов и уменьшению количества остаточного аустенита по мере увеличения содержания кремния. Кремний оказывает определенное и закономерное воздействие на процессы структурообразования при кристаллизации. Увеличение содержания кремния до 8 % устраняет ярко выраженную дендритную ликвацию наплавки. Возможной причиной, обуславливающей устранение дендритной ликвации, может быть процесс образования оксидов кремния. Кремний, обладая большим сродством к кислороду, взаимодействует с ним, образуя включения кремнезема. Металлографические исследования наплавочных материалов позволили обнаружить включения, имеющие продолговатую форму, располагающиеся вдоль границ. Они появляются в структуре наплавки уже при концентрации 4 % кремния, но сплошную сетку по границам зерен образуют при содержании кремния около 8%. Включения имеют неправильную вытянутую форму и голубоватую окраску.

Выделение оксидов кремния препятствует образованию длинномерных осей первого порядка, формирующих оси дендритов. В наплавочных материалах были обнаружены кристаллы кубической формы, золотистого цвета с размерами кристаллов порядка 2 мкм. Согласно металлографическим исследованиям, а также опираясь на результаты проведенного фазового анализа, эти включения были идентифицированы как фаза нитрид титана. Нитрид титана образуется при наплавке, при которой титан энергично связывает растворенный в материале азот. Азот в наплавленном слое находится как в связанном (нитрид титана), так и в газообразном, растворенном в α -фазе состояниях. Формирование избыточных фаз в виде нитрида титана является специфической особенностью процесса плазменной порошковой наплавки. Дисперсионное упрочнение за счет образования силицидов, оксидов кремния и нитрида титана повышает твердость наплавов: добавление 6-8 мас.% ведет к повышению твердости в 1,5-1,7 раза. Таким образом, несмотря на образование в наплавочных материалах, содержащих более 4 мас.% кремния, более пластичного феррита твердость повышается за счет образования гетерогенной структуры легированного дисперсионно-упрочненного феррита. В сплавах, с концентрацией кремния до 4 мас.% получена не упрочненная дисперсными частицами структура ($\alpha+\gamma$)-фаз.

Стали пониженной прокаливаемости (стали "ПП") для метода объемно-поверхностной закалки

Студент гр. 104216 Удот А.Ю.

Научный руководитель – Пучков Э. П.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск

В настоящее время существует проблема снижения себестоимости термообработанных изделий, которая решается заменой на методы позволяющие сократить расходы на энергоносители. Одним из таких методов является применение конструкционных сталей с пониженной прокаливаемостью, которые применяются при использовании метода объемно-поверхностной закалки. Метод объемно-поверхностной закалки стали (метод ОПЗ) разработан и получил промышленное применение в России для упрочнения ответственных, тяжелонагруженных деталей машин. Существует конструкционная сталь пониженной прокаливаемости, содержащая углерод, марганец, кремний, хром, никель, титан и железо, которая дополнительно содержит медь, алюминий и ванадий при следующем соотношении компонентов, мас. %: углерод 0,40-

0,85; марганец не более 0,20; кремний не более 0,20; хром не более 0,10, никель не более 0,10; медь не более 0,10; алюминий 0,03-0,10; титан 0,06-0,12; ванадий не более 0,40; железо - остальное. Главное преимущество - достижение гарантированной стабильности свойств пониженной прокаливаемости и получение "сверхмелкого" зерна закаленной стали величиной на уровне 11-12 баллов при закалке с температур в диапазоне от A_{c3} до $A_{c3}+100^{\circ}C$.

Метод ОПЗ имеет существенные технико-экономические преимущества перед известными, применяемыми в промышленности методами термического упрочнения:

1. Метод ОПЗ позволяет получить поверхностную, контурную закалку и одновременно упрочненную сердцевину на деталях сложной формы: шестернях, крестовинах и других с достижением рекордно высоких прочностных и служебных свойств по сравнению с другими методами упрочнения - цементацией, нитроцементацией, термическим улучшением и т.д.

2. Метод ОПЗ позволяет успешно заменить указанные длительные и трудоемкие процессы термической обработки, при этом вместо легированных сталей применять специальные углеродистые стали пониженной прокаливаемости (стали "ПП"), что позволяет при производстве конструкционных сталей снижать расход легирующих элементов (ферросплавов) в 3-7 раз и уменьшать их стоимость на 30-50%. Кроме того, по сравнению с цементацией и термическим улучшением достигается экономия за счет уменьшения расхода энергоносителей и замены закалки деталей в масле закалкой быстро движущейся водой.

3. Для ряда металлоемких деталей метод ОПЗ создает возможность снижать их массу (вес), например для рессор, на 25-30%.

4. При использовании метода ОПЗ достигается полная экологическая чистота процесса, так как используется только электронагрев и техническая вода без каких-либо добавок.

Метод ОПЗ основан на использовании специально созданных для этого процесса сталей, прокаливаемость которых согласована с размерами рабочего сечения деталей так, чтобы поверхностный слой детали при охлаждении быстро движущейся водой закаливался на структуру мартенсита ($HRC \approx 60$), а сердцевина - на структуру тростита и сорбита ($HRC = 30 - 45$).

Для деталей с небольшими размерами рабочего сечения - с диаметром или толщиной до 20 мм (шестерни среднего модуля, крестовины, рессоры и другие) стали для метода ОПЗ должны иметь прокаливаемость более низкую, чем прокаливаемость стандартных углеродистых конструкционных сталей (которые, как известно, имеют наиболее низкую прокаливаемость из всех конструкционных сталей). Поэтому такие стали для процесса ОПЗ получили название "стали пониженной прокаливаемости" (стали "ПП").

Прокаливаемость таких сталей, характеризуемая величиной "идеального критического диаметра", величина которого находится в пределах от 8 до 16 мм. Такие стали применяются для выполнения процесса ОПЗ на шестернях среднего модуля (от 4 до 12 мм), крестовинах, рессорах, пружинах и других деталях с небольшим размером их рабочего сечения. Примером таких сталей является сталь 58 (55ПП), которая по ГОСТ 1050-74 содержит компоненты в следующем соотношении в мас. %: углерод - 0,55 - 0,63; кремний - 0,10 - 0,30; марганец - не более 0,20; хром - не более 0,15; сера - не более 0,040; фосфор - не более 0,035; медь - не более 0,25; никель - не более 0,25; мышьяк - не более 0,08; железо - остальное; (Марочник сталей и сплавов. П/р В.Г. Сорокина, М., Машиностроение, 1989, стр. 78-79).

После закалки методом ОПЗ достигается твердость поверхностного слоя HRC 58-59, а сердцевины HRC 26-28 при величине критического диаметра 6,5 - 19,0 мм. Однако для достижения более высоких прочностных и служебных свойств деталей, упрочняемых процессом ОПЗ, крайне важным является достижение в термически

обработанных деталях так называемого сверхмелкого зерна закаленной стали величиной 11- 12 баллов по стандартной шкале (при этом средняя площадь зерна $60\text{-}30\text{ мкм}^2$; в то время как при традиционных методах термообработки достигается зерно величиной 7-8 баллов, то есть площадью $1000\text{-}500\text{ мкм}^2$). Таким образом в первом случае зерно мельче в среднем в 15-20 раз.

Наиболее близким аналогом изобретения является конструкционная сталь пониженной прокаливаемости по авторскому свидетельству СССР N 128482 от 31.10.59, содержащая компоненты в следующем соотношении в мас. %: углерод - 0,4 - 1,2; марганец - не более 0,20; кремний - не более 0,3; хром - не более 0,3; никель - не более 0,25; титан - не более 0,5; железо – остальное.

Опыт показывает, что у такой стали свойства пониженной прокаливаемости и склонность к росту зерна имеют разброс от плавки к плавке, что требует для каждой плавки корректировки режима нагрева при закалке и термической обработки.

Однако данная конструкционная сталь пониженной прокаливаемости содержит компоненты в следующем соотношении в мас. % и позволяет получить наилучшие результаты: углерод - 0,40 - 0,85; марганец, кремний - не более 0,20; хром, никель, медь - не более 0,10; алюминий - 0,03 - 0,10; титан - 0,06 - 0,12; ванадий - не более 0,40; железо – остальное.

Стали "ПП" могут быть успешно применены не только для рессорных листов, но также для широкого круга ответственных тяжело нагруженных деталей машин: цилиндрических и конических шестерен и зубчатых колес, крестовин, поршневых пальцев, шаровых пальцев, подшипников и других. В зависимости от размеров рабочих сечений деталей могут быть выбраны необходимый уровень прокаливаемости и вариант стали. Соответствующие расчеты прокаливаемости стали по ее химическому составу и величины глубины закалки, получаемые в закаленных деталях, детально разработаны и применяются на практике.

При ОПЗ за один технологический цикл нагрева и охлаждения достигается поверхностная закалка на заданную глубину и максимальную твердость, уровень которой зависит главным образом от содержания углерода в стали, и упрочнение глубинных слоев и сердцевины деталей на структуру тонкой феррито-цементитной смеси (сорбита или троостосорбита закалки). Такое сочетание обеспечивает высокий уровень механических свойств изделий при разнообразных наиболее характерных видах нагружения деталей в эксплуатации.

Влияние ОПЗ на основные технические и эксплуатационные характеристики изделий заключается в следующем:

А. Износостойкость.

Наиболее типичным и опасным видом износа является износ при контакте металлических поверхностей в присутствии частиц естественного абразива. Основным фактором повышения износостойкости в этих условиях является увеличение твердости материала, желательного до уровня, превышающего твердость абразива.

Решение такой задачи представляет затруднения для объемной закалки деталей на высокую твердость по всему сечению, так как при этом резко падает хрупкая прочность изделий. Объемно-поверхностная закалка позволяет эффективно решать этот вопрос за счет создания твердой износостойкой поверхности с твердостью 45-50 HRC и вязкой сердцевины с твердостью 20-25 HRC для литых низкоуглеродистых сталей типа 20ГЛ.

Б. Механические свойства и микроструктура

Для наиболее нагруженных поверхностных слоев деталей после ОПЗ поверхностный слой, закаленный на мартенсит, в зависимости от содержания углерода, имеет твердость 56-63 HRC, временное сопротивление разрыву 2200-2600 МПа,

относительное сужение 15-30 %, коэффициент интенсивности напряжения (вязкость разрушения) $K_{IS} = 1600-2700 \text{ Н/мм}^{3/2}$ при 0,4 - 1,0 % С, соответственно.

Сердцевина изделий после ОПЗ имеет структуры сорбита или троостосорбита с твердостью 30-40 HRC и свойствами $\sigma_B = 1150-1250 \text{ МПа}$, $\psi = 40-50\%$ и ударная вязкость $50-80 \text{ Дж/см}^2$. Указанные свойства, достигаемые в сердцевине изделий из обычных углеродистых сталей после ОПЗ находятся на уровне свойств деталей из легированных сталей, подвергнутых цементации, закалке и низкому отпуску.

После ОПЗ поверхностный закаленный слой находится в высокопрочном состоянии, а сердцевина имеет запас вязкости, что позволяет детали, подвергнутые ОПЗ, эксплуатировать при более высоких нагрузках, чем детали после цементации или объемной закалки с отпуском.

В. Циклическая долговечность

Важнейшим фактором повышения конструктивной прочности изделий после ОПЗ является создание в поверхностных слоях высоких остаточных сжимающих напряжений, обеспечивающих их высокую циклическую долговечность. Так предел выносливости внутренних колец подшипника из стали ШХ4 после ОПЗ увеличивается с 70 кН до 110 кН.

Существенное преимущество деталей после ОПЗ в сравнении с другими видами упрочнения (объемная закалка и отпуск, улучшение) выявлено и по результатам динамических испытаний. Основными факторами здесь служат мелкозернистость аустенита и высокие остаточные сжимающие напряжения в поверхностных слоях.

В табл. 1 приведены примеры эффективного применения метода ОПЗ в массовом производстве для деталей тяжелого машиностроения.

Таблица 1 – Примеры эффективного применения метода объемно-поверхностной закалки в массовом производстве

Детали	Марки сталей		Технико-экономическая эффективность
	старые	новые	
Шестерни среднего модуля $m=5-8 \text{ мм}$	18ХГТ 30ХГТ 20ХНМ	58(55 ПП) ГОСТ 1050-88	1. Исключение цементации 2. Снижение стоимости стали и себестоимости деталей 3. Повышение долговечности деталей
Крупномодульные шестерни $m=10-14 \text{ мм}$	12ХНЗА	ШХ4 ГОСТ 801-88	1. Исключение цементации 2. Повышение долговечности в 2 раза, снижение стоимости стали в 1,5 раза
Крестовины карданных передач	18ХГТ 20ХГНРТ	58(55ПП) ГОСТ 1050-88	1. Исключение цементации. 2. Снижение стоимости стали и себестоимости деталей. 3. Повышение конструктивной прочности.

Важнейшим условием качественного упрочнения является получение высокопрочного износостойкого поверхностного слоя в нагруженных зонах, либо по всем поверхностям деталей.