

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 30ХГСН2А

Газетдинова А.О., Стрелкова И.Л.

Научный руководитель: Панин В.Е., академик

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/1

E-mail: strelkova@tpu.ru

Введение

Одной из проблем современного машиностроения является повышение надежности и долговечности ответственных деталей из высокопрочных сталей, применяемых в космической, ракетной, авиационной технике, а также в ряде отраслей машиностроения. Работоспособность и надежность таких конструкций зависят от качества поверхности деталей, поскольку, отказ изделий происходит, как правило, вследствие повреждений усталостного характера.

Распространенным способом улучшения поверхности является упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием с введением в зону обработки энергии ультразвуковых колебаний. После такой обработки образовавшийся микрорельеф поверхности снижает концентрацию напряжений в местах надрезов и уменьшает стадию зарождения трещин в общем цикле усталостного процесса, увеличивая в 2-3 раза ресурс работы детали. Однако, практически, не существует рекомендаций по применению такой обработки для формирования заданной величины упрочнения обработанных поверхностей применительно к конкретному металлическому сплаву.

Целью настоящей работы является исследование влияния поверхностного ультразвукового деформирования на структуру и механические свойства высокопрочной стали 30ХГСН2А.

Материал и методики исследований

Материалом для исследования является мартенситная высокопрочная сталь марки 30ХГСН2А. Она применяется в авиационной промышленности для изготовления деталей конструкций ответственного назначения, когда требуются высокие значения прочности, жесткости, усталостной долговечности.

Для исходного материала проводили закалку от $t = 890^\circ\text{C}$ в масле и низкий отпуск при $t = 230^\circ\text{C}$ с охлаждением на воздухе. Затем электроискровым способом вырезали образцы стандартных размеров в форме двойной лопатки – для определения механических свойств, и параллелепипеда с U-образным надрезом $r = 2$ мм – для испытаний на ударную вязкость.

Ультразвуковую финишную обработку (УФО) осуществляли с помощью комплекса оборудования ИЛ-4 [1] с контролируемой выходной мощностью ультразвукового генератора 630 Вт. Частота и амплитуда колебаний инструмента ($r = 2$ мм) составляли соответственно $27 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ и 20 мкм,

статическая сила прижима инструмента к поверхности образцов – 200 Н.

Структурно-фазовое состояние стали исследовали с помощью методов оптической металлографии (Axiovert 25CA) и растровой электронной микроскопии (Carl Zeiss Evo 50 XVP). Электронно-микроскопические исследования структуры проводили на просвечивающем электронном микроскопе Technai G2 FEI.

Испытания на ударную вязкость проводили на маятниковом копре JB 300 со скоростью движения маятника в момент удара 5,5 м/с. Механические характеристики определяли при статическом растяжении со скоростью 0,3 мм/мин на испытательной машине «Instron-5582».

Микротвердость измеряли на полуавтоматическом приборе DURAMIN-5 с нагрузкой на пирамидку Виккерса $P = 100$ г и временем выдержки $t = 12$ сек.

Результаты исследования и их обсуждения

После термической обработки образцы стали имеют микроструктуру с размером зерен $d \sim 7-10$ мкм и структуру, представляющую собой реечный мартенсит с поперечным размером реки $h_p = 50-60$ нм, остаточный аустенит (до 5%), расположенный по границам мартенситных кристаллов в виде тонких прослоек толщиной 10-20 нм и небольшого количества карбидов цементитного типа размерами 0,4-1 мкм (рис. 1а).

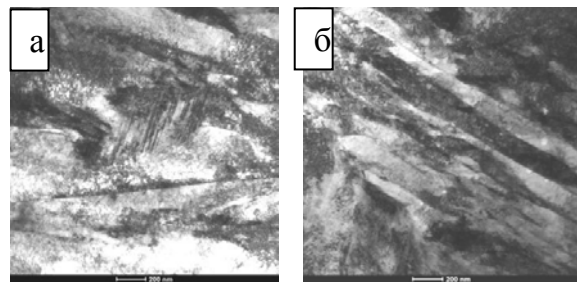


Рис.1. Микроструктура стали 30ХГСН2А: а – после термической обработки; б – после УФО

В результате УФО происходит изменение структурно-фазового состояния поверхностного слоя образцов стали. Выявлено, что в поверхностном слое толщиной до 5-7 мкм (рис. 1б) сохраняется структура пакетного мартенсита, но с образованием субзеренной структуры в результате фрагментации и дробления кристаллов мартенсита, с размером структурных элементов до $d = 50-75$ нм, характеризующейся более высокой концентрацией дефектов (поперечный размер рек при этом составляет $h_p = 5-10$ нм). Наличие этих

факторов приводит к улучшению механических свойств стали (табл.).

Таблица. Механические свойства стали
30ХГСН2А

Вид обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ε , %	Hv, ГПа	KCU, кДж/м ²
Закалка + отпуск	360	1670	8	4,1	590
ТО + УФО	300	1450	12	5,1	760

Установлено, что УФО образцов приводит к увеличению на 4% пластичности и в 1,5 раза ударной вязкости. Значения σ_T и σ_B изменяются незначительно, что свидетельствует о сохранении высокопрочного состояния металла. Увеличение пластичности, по-видимому, можно связать с разным характером развития пластического течения, связанным с образованием микротрещин в упрочненном поверхностном слое. В устье каждой такой трещины возникают симметричные двулепестковые зоны макродеформации, которые, взаимодействуя между собой, пластифицируют весь объем материала.

На рис. 2 представлены результаты измерения микротвердости на поперечных шлифах исследуемых образцов. Как и ожидалось, воздействие поверхностного ультразвукового деформирования приводит к повышению микротвердости поверхностного слоя Hv с 4 до 5,1 ГПа на глубину $h = 10 \pm 30$ мкм.

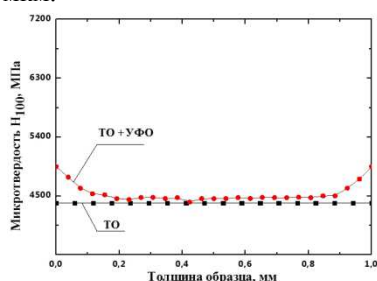


Рис. 2. Значения микротвердости, измеренные на поперечных шлифах

Очевидно, что такое различие значений микротвердости связано с особенностями микроструктурного состояния образовавшегося поверхностного слоя и необходимостью дополнительных исследований. Различие структурных и механических характеристик, как правило, должно определять особенности циклической прочности и долговечности исследуемых образцов стали.

Многолетний опыт применения этой стали в самолетостроении показал, что уровень ее надежности зависит от достаточных значений предела прочности и вязкости разрушения.

Фрактографический анализ поверхностей изломов показал, что в образцах формируется градиентная структура, состояние которой изменяется по мере удаления от поверхности. При этом реализуется внутризеренное ямочное разрушение с ямками различной величины (рис.3). В области, близкой к поверхности, ямки более мелкие и однородные (рис.3а), что свидетельствует о создании тонкого высокопрочного слоя, который является защитным и препятствует развитию пластической деформации в основной объем металла. В последнем наблюдается вязкое разрушение с глубокими ямками, выстроенными в виде протяженных гребней (рис. 3б). Они формируются при слиянии соседних вязких микротрещин и свидетельствуют о смешанном характере разрушения. Зона усталостного разрушения занимает большую площадь, чем область долома. Это является свидетельством того, что образец после зарождения трещины может работать еще довольно длительное время.

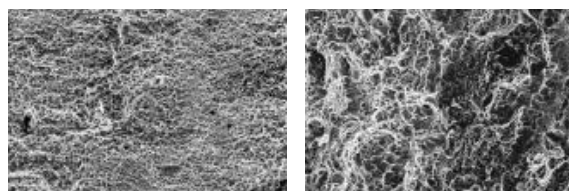


Рис.3. Фрактограммы изломов образца, обработанного УФО и испытанного на ударную вязкость

Заключение

Исследовано влияние поверхностного ультразвукового деформирования на структуру и механические свойства высокопрочной стали 30ХГСН2А.

Показано, что наиболее явные изменения микроструктуры, связанные с фрагментацией мартенситных зерен до размера $d = 50-70$ нм, происходят в поверхностной области на глубине $h = 5-7$ мкм. При этом формируется градиентная структура приповерхностной области без явной границы раздела с основным объемом материала, что исключает опасность отслоения упрочненного слоя.

Установлено, что упрочнение тонкого поверхностного слоя приводит к увеличению в 1,5 раза пластичности и ударной вязкости образцов. Это дает основания полагать об эффективности применения этой методики для увеличения усталостной долговечности и прочности.

Литература

1. Панин В. Е., Каблов Е.Н., Плешанов В.С. и др. влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12// Физ. мезомех. – 2006. - Т. 9. - № 2. - С. 85-96.