**НАНОСТРУКТУРИРУЮЩАЯ ФРИКЦИОННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

**Макаров А.В.**

Д.т.н., заведующий отделом материаловедения

Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН

Представлены результаты оригинальных разработок материаловедческих основ фрикционных и комбинированных технологий, формирующих на поверхности металлических сплавов градиентные наноструктурированные слои с повышенными механическими и трибологическими характеристиками при одновременном обеспечении наношероховатости (Ra<100 нм) поверхности (двойные нанотехнологии, не имеющие прямых аналогов в мире).

Рассмотрено место наноструктурирующей фрикционной обработки скользящими инденторами среди известных методов наноструктурирования металлических материалов. Формирование нанокристаллических структур при фрикционной обработке сплавов обусловлено высокими сжимающими и сдвиговыми напряжениями в зоне фрикционного контакта, где металл деформируется в условиях сдвига под давлением и создаются условия для реализации в слое толщиной до 10 мкм ротационных мод деформации. На основе экспериментальных исследований и математического моделирования установлены ключевые технологические факторы, определяющие эффективное наноструктурирование поверхностного слоя при фрикционной обработке: нормальная нагрузка на индентор, достаточная для формирования новой поверхности с наношероховатостью; высокий коэффициент трения для усиления сдвиговой деформации; кратность фрикционного воздействия для накопления деформации; использование безокислительной среды обработки с целью предотвращения охрупчивания наноструктурированного слоя кислородом (по трем последним факторам рассматриваемая нанотехнология принципиально отличается от традиционного алмазного выглаживания).

Важным новым материаловедческим подходом в обеспечении эффективности упрочнения сплавов при фрикционной обработке является использование исходных метастабильных структур, способных к интенсивному деформационному упрочнению благодаря активному развитию структурных и фазовых превращений при образовании в зоне фрикционного контакта нанокристаллических структур трения. Такими метастабильными структурами являются неотпущенный тетрагональный мартенсит (возникающий, например, при лазерной закалке сталей), метастабильный остаточный аустенит, неравновесный тонкопластинчатый перлит (представляющий по сути нанокомпозит из тонких прослоек феррита с повышенной концентрацией углерода и дефектного цементита), пересыщенные метастабильные состояния в хромоникелевых лазерных покрытиях и др.

Финишная наноструктурирующая фрикционная обработка готовых изделий из сталей мартенситного и аустенитного классов не только обеспечивает формирование поверхности с низкой шероховатостью и благоприятными сжимающими напряжениями, но и эффективное повышение твердости и теплостойкости (теплостойкость простых углеродистых сталей возрастает до уровня теплостойкости высоколегированных сталей). При этом достигается кратный рост износостойкости при абразивном изнашивании и трении скольжения, в том числе повышение сопротивления тепловому изнашиванию в условиях трения скольжения с большими (более 2 м/с) скоростями. По данным микроиндентирования наноструктурирующие обработки увеличивают способность поверхностного слоя противостоять упруго-пластическому деформированию. Это ограничивает развитие различных механизмов абразивного и адгезионного изнашивания и устраняет период приработки при трении.

Показана эффективность комбинированных деформационно-термических обработок (фрикционная обработка + отпуск), обеспечивающих для сталей со структурой мартенсита 2-3-кратный рост твердости и износостойкости при сохранении удовлетворительной пластичности, а для сталей со структурой метастабильного аустенита – дополнительное упрочнение мартенсита деформации карбидами хрома при старении или формирование высокопрочной наноструктуры аустенита в результате деформационного прямого γ→α′- и обратного (при нагреве) α′→γ-превращений.

Предложены методики неразрушающего электромагнитного контроля: глубины упрочненного фрикционной обработкой слоя и, соответственно, качества фрикционной обработки стальных изделий; структурного состояния сталей после фрикционной обработки и отпуска (комбинированные наноструктурирующие деформационно-термические обработки); механических свойств и износостойкости поверхностно наноструктурированных сталей; трещинообразования при малоцикловом усталостном нагружении углеродистых сталей, а также фазового состава и твердости метастабильной аустенитной стали с наноструктурированным поверхностным слоем.

Важным преимуществом способа фрикционной обработки является возможность наноструктурирования поверхностных слоев толщиной 5-10 мкм изделий практически любых размеров даже из высокопрочных и труднодеформируемых материалов, таких как лазерные наплавки, инструментальные (в том числе быстрорежущие) и конструкционные стали, упрочненные как объемной, так и поверхностной (например, лазерной) закалкой или химико-термической обработкой. Фрикционная обработка в отличие от других способов наноструктурирования обладает высоким потенциалом промышленного использования и может успешно применяться в современном машиностроительном производстве в качестве финишной наноструктурирующей обработки прецизионных деталей ответственного назначения на многофункциональных токарно-фрезерных центрах. Области применения наноструктурирующей фрикционной обработки на машиностроительных предприятиях – для стальных изделий, эксплуатируемых в условиях интенсивного износа, высоких давлений, значительного нагрева, низких климатических температур: детали запорной трубопроводной арматуры, нефтегазового и насосно-компрессорного оборудования, валы, подшипники, гильзы цилиндров, инструмент и др.

Продемонстрировано использование фрикционных обработок при совершенствовании других перспективных технологий поверхностных наноструктурирующих обработок: наноструктурирующая ультразвуковая ударно-фрикционная обработка как развитие метода ультразвуковой ударной обработки; использование фрикционной обработки в комбинации с последующим плазменным азотированием для активизации химического модифицирования металлических поверхностей.