

Повышение работоспособности деталей машин с помощью нанотехнологии

Показано, что в процессе механоимпульсной обработки, базирующейся на использовании энергии высокоскоростного трения, формируется поверхностная нанокристаллическая структура с повышенной микротвердостью, низким коэффициентом трения. Приведены зависимости параметров упрочненного слоя и качества поверхности от технологических режимов обработки. Показана высокая износостойкость упрочненного поверхностного слоя и перспективность ее использования для повышения работоспособности деталей машин. Ил. 7. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: нанокристаллическая структура, механоимпульсная обработка, микротвердость, износостойкость

It is shown that mechanic-impulse processing based on the energy of high-speed friction results in forming the surface nanocrystalline structure with high microhardness and low coefficient of friction. The dependences of the parameters of the hardened layer and the surface quality on the technological modes of treatment are shown. The high wear resistance of the hardened surface layer and the prospect of its usage for improving of equipment details efficiency is proved.

Keywords: nanocrystalline structure, mechanic-impulse processing, microhardness, wear resistance

В последние десятилетия повышение ресурса работы конструкционных сталей достигали разработкой сплавов с новым химическим и фазовым составом. В данное время наметился новый путь управления свойствами металлов целенаправленным формированием микро- и нанокристаллической структуры (НКС). Одним из путей получения НКС есть интенсивная пластическая деформация (ИПД) работающая в том же направлении что легирование и термическая обработка. Существуют методы создания объемных и поверхностных НКС. Поверхность ответственна за такие эксплуатационные характеристики деталей машин (ДМ) как усталость, износостойкость, контактная выносливость, коррозионно-эрозионное разрушение, кавитация и другие. В Физико-механическом институте им. Г.В. Карпенко НАНУ разработана технология получения поверхностных НКС ИПД высокоскоростным трением механоимпульсной обработкой (МИО). Она кинематически аналогична шлифованию (рис. 1) и реализуется на токарных или плоскошлифовальных станках путем их незначительной модернизации.

Сущность технологии состоит в нагреве поверхностных слоев металла скоростным трением до температур выше точки A_{c3} , одновременной термопластической деформации и последующем интенсивном охлаждении со скоростями 10^3 – 10^4 °C/c за счет отвода тепла из приповерхностных слоев в инструмент, деталь и технологическую среду (ТС). В результате МИО в приповерхностных слоях происходят структурно-фазовые превращения и формируется градиентная мелкокристаллическая структура нанометрового диапазона (15–30 нм) в основном мартенситного класса с величиной микротвердости 6–12 ГПа. В условиях скоростной термопластической деформации в

приповерхностных слоях происходит их насыщение легирующими элементами из полимерных ТС. При обработке низкоуглеродистых сталей целесообразно использовать ТС для науглероживания или азотирования. Это дополнительно улучшает физико-механические и коррозионные свойства приповерхностных слоев.

Важным фактором, влияющим на температурно-силовые условия в зоне фрикционного контакта (ФК) в процессе МИО, является упрочняющий инструмент. Температура в зоне ФК зависит от коэффициента трения упрочняющего инструмента и детали. Теплота, генерируемая в зоне ФК, поглощается упрочняемой деталью, инструментом и ТС. Тепловые потоки в инструмент и деталь зависят от соотношения их скоростей. Большое количество теплоты поглощается телом, вращающимся быстрее. Так как скорость инструмента намного больше скорости детали, то основное количество теплоты поглощается инструментом. Для предотвращения этого инструменты изготавливают из материалов с высоким коэффициентом трения и низкой теплопроводностью. Этим требованиям наиболее соответствуют нержавеющие стали и титановые сплавы. При таких условиях в приповерхностных слоях возникают температуры 850–1500 К (рис. 2). Использование инструмента из титанового сплава обеспечивает максимальные температуры в приповерхностных слоях упрочняемой детали. В зоне ФК за счет интенсивных сдвиговых деформаций осуществляется скоростное термопластическое деформирование (10^2 – 10^3 с⁻¹).

Установлено, что в процессе ИПД во время МИО происходит диспергирование зеренной структуры поверхностного слоя стального образца от микро- до субмикро- и наноразмерной. Формирование структу-

ры поверхностного слоя в процессе ИПЛ

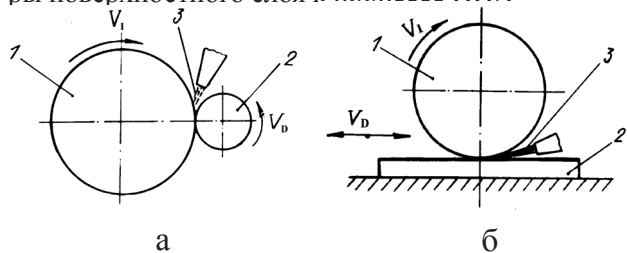


Рис. 1. Схема МИО цилиндрических (а) и плоских (б) поверхностей: 1 – упрочняющий инструмент; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – технологическая среда (ТС)

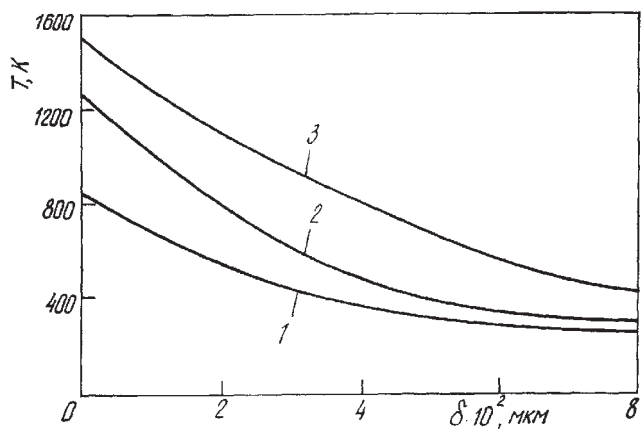


Рис. 2. Распределение температуры по глубине детали при упрочнении стали 45 (феррит-перлит) инструментом из различных материалов: 1 – сталь 40X; 2 – сталь 12X18H9T; 3 – сплав ВТ6, ТС – воздух

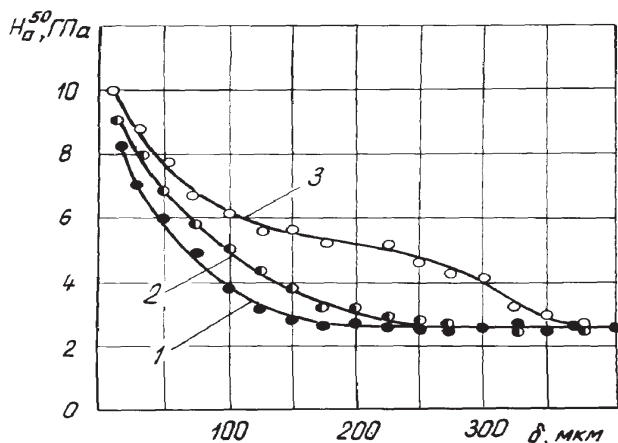


Рис. 3. Распределение микротвердости на стали 45 после МИО инструментом из различных материалов: 1 – сталь 40X; 2 – сталь 12X18H9T; 3 – титановый сплав ВТ6

имеет многоуровневый характер и с увеличением степени и скорости деформации реализуется на новых, высших структурных уровнях диспергирования. Поскольку во время МИО приповерхностные слои нагреваются в зоне ФК до температур выше точки A_{c3} и охлаждаются ниже A_{c1} то проходят структурно-фазовые превращения в результате которых возникает в большинстве случаев мартенситно-аустенитная структура. В зависимости от материала инструмента меняется размер зерна, структурно-фазовый состав, а соответственно микротвердость и глубина упрочненного слоя (рис. 3)

На рис. 4 приведено электронно-микроскопическое изображение структуры стали 45 на разных глубинах после МИО, а на рис. 5 – дифрактограммы, снятые на тех же глубинах. Структура сильно фрагментирована и степень фрагментации возрастает по мере приближения к поверхности. Это подтверждают результаты электронно-микроскопических исследований пленок на просвет микроструктуры упрочненного слоя. Основной особенностью НКС, полученных интенсивным пластическим деформированием, есть наличие неравновесных границ зерен, служащих источником больших внутренних напряжений. Подтверждением этого есть изогнутые контуры границ в зернах (рис. 4). Неравновесные границы зерен имеют большое количество дислокаций, а в тройных стыках сконцентрированы нескомпенсированные дисклинации. Плотность дислокаций достигает $1,6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Дислокации и дисклинации образуют дальнедействующие поля напряжений, служащие причиной избыточной энергии границ зерен.

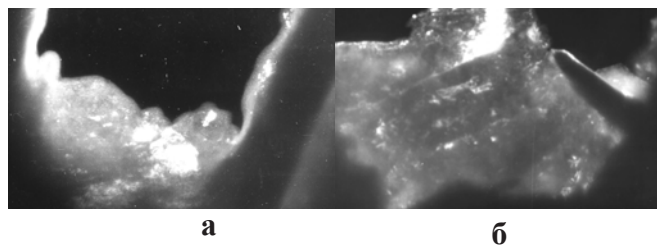


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 45 ($\times 100000$) на глубине 10 (а) и 15 мкм (б) от поверхности после МИО в ТС для науглероживания [5]

На глубине 15 мкм в упрочненном слое максимальный размер фрагментов не превышает 25 нм,

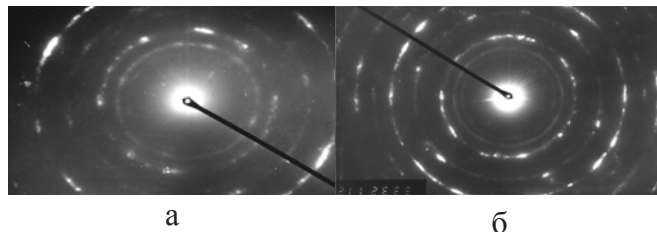


Рис. 5. Дифрактограммы структуры стали 45, снятые на глубине 10 (а) и 15 мкм (б) от поверхности после МИО в ТС для науглероживания

тогда как размеры зерен матрицы 1-4 мкм. На электронограммах упрочненного слоя наблюдаем расщепление отдельных дифракционных рефлексов на группы. Это служит подтверждением того, что в процессе термопластической деформации коллективные формы эволюции дислокационного ансамбля вызывают не только трансляционные пластические сдвиги соседних частей кристалла, но и их пластические развороты. Максимальное азимутальное расщепление рефлексов на участке микродифракции (1 мкм) не превышает 6° . Это уже большеугловая граница и, значит, данный фрагмент – зерно. На глубине 10 мкм наблюдаем еще более фрагментированную структуру. Увеличивается их пространственная разориентация. Максимальное азимутальное расщепление рефлек-

сов на электронограммах становится уже 10° . С приближением до поверхности возрастает степень фрагментации кристаллитов.

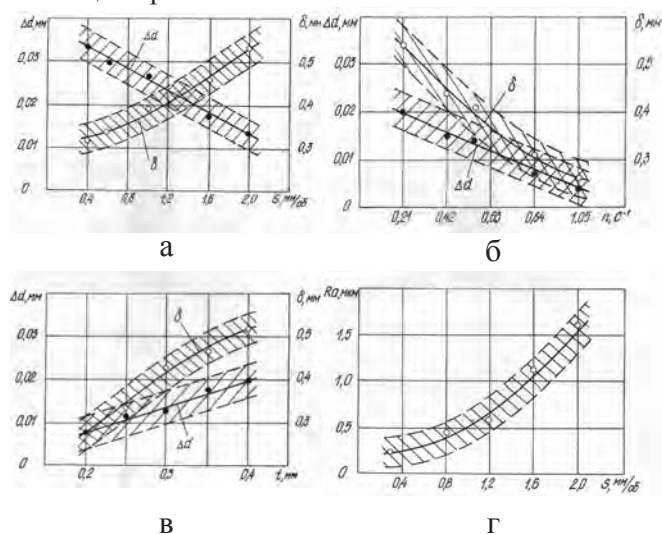


Рис. 6. Изменение толщины упрочненного слоя (б) и величины усадки металла (Δd) на цилиндрических образцах диаметром 20 мм из стали 45 (феррит - перлит) в зависимости от продольной подачи S при $n = 0,83 \text{ с}^{-1}$, $t = 0,3 \text{ мм}$ (а), частоты вращения детали n при $S = 1,5 \text{ мм/об}$, $t = 0,3 \text{ мм}$ (б), глубины врезания t при $n = 0,83 \text{ с}^{-1}$, $S = 1,5 \text{ мм/об}$ (в) и шероховатости от продольной подачи S при $n = 0,83 \text{ с}^{-1}$, $t = 0,3 \text{ мм}$ (г)

Важными параметрами упрочненного поверхностного слоя являются его глубина, микротвердость, шероховатость поверхности. Они зависят от режимов упрочнения, материала упрочняющего инструмента, глубины врезания (усилия давления) инструмента, частоты вращения детали, продольной подачи инструмента. В результате нагрева и высокого давления в зоне ФК инструмент сминает микронеровности и проходит усадка металла.

На рис. 6 приведены зависимости изменения толщины упрочненного слоя и величины усадки металла в зависимости от режимов обработки при использовании инструмента из стали 40Х и скорости его вращения 50 м/с. В зону ФК подавали ТС для науглероживания. С увеличением продольной подачи S в диапазоне 0,8-2,0 мм/об толщина упрочненного слоя δ монотонно увеличивается (рис.6а), а усадка металла Δd резко уменьшается. Увеличение продольной подачи увеличивает усилие обработки, а соответственно и мощность, превращающуюся в тепловую энергию в зоне ФК. Это ведет к увеличению глубины упрочненного слоя. Увеличение глубины врезания инструмента t в диапазоне 0,2-0,4 мм аналогично приводит к росту составляющих усилия упрочнения и соответственно к увеличению глубины упрочненного слоя (рис. 6б). При глубине врезания больше 0,4 мм толщина упрочненного слоя уменьшается, что связано с оплавлением его приповерхностного слоя и выносом металла из зоны контакта. Увеличение частоты вра-

щения упрочняемой детали ведет к уменьшению глубины упрочненного слоя δ и усадки металла Δd (рис. 6в). Это связано с уменьшением времени пребывания соответствующего участка упрочняемой детали в зоне ФК и, соответственно, уменьшением глубины прогрева металла.

Необходимо отметить, что глубина упрочненного слоя больше всего зависит от содержания углерода в стали и может достигать на высокоуглеродистых сталях 0,8 мм при микротвердости 10–12 ГПа. Упрочнение сталей в улучшенном состоянии также ведет к увеличению толщины упрочненного поверхностного слоя.

На шероховатость упрочняемой поверхности влияют главным образом геометрия упрочняющего инструмента и продольная подача. Увеличение продольной подачи ведет к ухудшению шероховатости поверхности (рис.6г), глубина упрочненного слоя при этом увеличивается (рис. 6а).

Нанокристаллические структуры вообще и полученные этой обработкой в частности имеют пониженный (в 1,5-4 раза) коэффициент трения. Это ведет к повышению износостойкости сталей при сухом трении, в масляной и масляно-абразивной средах.

Заключение

Технология МИО прошла опытно-промышленные испытания и внедрена в производство для обработки защитных втулок, разгрузочных колец и дисков насосов, втулок ствола вертлюга бурильного агрегата, седел и тарелок бурильных насосов, пальцев конвейеров и элеваторов, лопаток дробебетных аппаратов, штоков гидроцилиндров и др. Увеличение ресурса работы деталей достигает 1,5-4 раза в зависимости от условий работы деталей при увеличении себестоимости обработки на 25–30 %. МИО перспективна для упрочнения металлургической оснастки (валки горячей прокатки, дорны, оправки для формирования внутреннего диаметра труб, бурильные трубы и др..)

Таким образом, механоимпульсная обработка базирующаяся на принципах высокоскоростного трения, формирует в приповерхностных слоях сталей НКС с повышенной микротвердостью, пониженным коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Применение технологии позволяет увеличить межремонтный цикл, ликвидировать простои оборудования, уменьшить дефицит запасных частей и расход энергоресурсов.

Поступила 05.02.2013