

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ

Романов Д.А., Гаевой Е.А., Степиков М.А., Громов В.Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия,
romanov_da@physics.sibsiu.ru*

Электровзрывным методом на инструментальной штамповой стали X12MФ и 5ХНМ сформирован модифицированный слой. Выполнены физико-механические (определены твердость и модуль Юнга) и трибологические (определены коэффициент износа и коэффициент трения) испытания. Выявлено увеличение микротвердости модифицированного слоя стали 5ХНМ более чем в 2 раза и стали X12MФ в ≈ 4 раза; износостойкость стали 5ХНМ увеличилась в $\approx 1,2$ раза, а стали X12MФ в ≈ 50 раз по отношению к стали в исходном состоянии. Показано, что основными физическими причинами повышения механических и трибологических свойств материала являются: в стали 5ХНМ формирование закалочной структуры, упрочненной частицами карбида железа и карбида титана; в стали X12MФ – наличие частиц второй фазы, вносимых в материал при электровзрывном легировании.

Результаты исследования твердости и модуля Юнга модифицированного слоя стали 5ХНМ и X12MФ приведены на рис.1. Исследование твердости модифицированного слоя стали осуществляли вдоль прямых, проведенных параллельно поверхности модифицирования и границы раздела «модифицированный слой / зона термического влияния», и расположенных на расстоянии 14 мкм от них. Анализируя результаты, представленные на рис.1, можно отметить, во-первых, кратное (в 2 и 4 раза) превышение твердости модифицированного слоя над твердостью стали 5ХНМ и X12MФ в исходном состоянии, и, во-вторых, высокий уровень неоднородности модифицированного слоя по твердости, что особенно характерно для слоя, расположенного вблизи поверхности модифицирования (рис. 1, кривые 1 и 3). Данные замечания можно высказать и в отношении величины модуля Юнга.

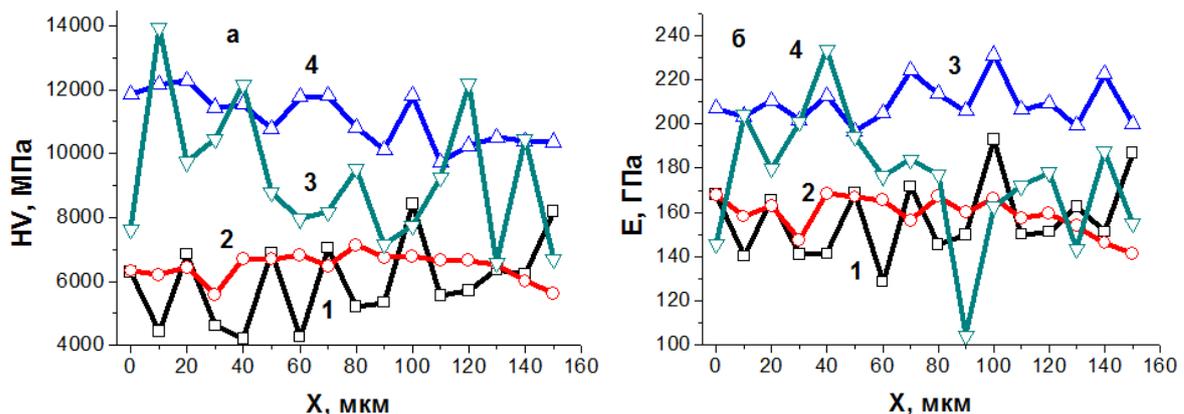


Рисунок 1- Изменение твердости (а) и модуля Юнга (б) модифицированного слоя стали 5ХНМ (кривые 1 и 2) и стали X12MФ (кривые 3 и 4) в слое, расположенном на расстоянии 14 мкм от поверхности модифицирования

В табл. 1 приведены результаты трибологических испытаний стали 5ХНМ, модифицированной электровзрывным методом. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что модифицирование стали 5ХНМ способствует снижению в $\approx 1,2$ раза коэффициента износа (увеличение износостойкости) и увеличению (в $\approx 1,25$ раза) коэффициента трения. В стали X12MФ выявляется снижение в ≈ 50 раз коэффициента износа (увеличение износостойкости) и в $\approx 1,1$ раза коэффициента трения.

Таблица 1 - Трибологические характеристики стали X12MФ и 5XНМ, модифицированных электровзрывным методом

Образец	Коэффициент трения, μ	Коэффициент износа, 10^{-6} , $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$
X12MФ	0,39	5,5
X12MФ + Cr_3C_2 -TiC-Ni	0,35	0,11
5XНМ	0,4	5,8
5XНМ + TiC-Ni-Al	0,5	4,7

Выполненные испытания стали 5XНМ и X12MФ, модифицированных электровзрывным методом, выявили повышение микротвердости и износостойкости материала, что обусловлены, очевидно, изменением структуры и фазового состава модифицированного слоя стали.

Исследования модифицированного слоя стали 5XНМ, выполненные методами дифракционной электронной микроскопии, выявили закалочную структуру, представленную пластинчатым (двойниковым) и пакетным (реечным) мартенситом. В объеме кристаллов мартенсита обнаруживается дислокационная субструктура в виде многослойных сеток. Скалярная плотность дислокаций превышает значение 10^{10} см^{-2} , что характерно для закаленной стали. Исследование фазового состава модифицированного слоя стали выявили присутствие в кристаллах мартенсита частиц пластинчатой (игольчатой) формы, которые являются, очевидно, частицами карбида железа (цементит). Можно предположить, что частицы цементита сформировались в результате «самоотпуска» стали, т.е. отпуска, протекающего в процессе охлаждения стали ниже температуры начала мартенситного превращения. Наряду с частицами цементита в структуре модифицированного слоя стали 5XНМ обнаружены частицы, имеющие округлую форму и располагающиеся в структуре хаотически, либо формирующие небольшие (по 3-5 частиц) скопления. Размеры таких частиц изменяются в пределах от 25 нм до 40 нм. Можно предположить, что данные частицы были внесены в поверхностный слой стали при электровзрывном модифицировании и, следовательно, являются частицами карбида титана.

Электровзрывным методом осуществлено модифицирование поверхностного слоя стали 5XНМ и X12MФ. В модифицированном слое стали 5XНМ выявлено формирование закалочной структуры, представленной пакетным и пластинчатым (двойниковым) мартенситом. Установлено, что упрочняющей фазой модифицированного слоя стали 5XНМ являются наноразмерные частицы карбидов железа и титана. Электровзрывное модифицирование стали X12MФ сопровождается формированием структуры перлита пластинчатой морфологии, содержащей округлые включения второй фазы субмикронных размеров. Установлено, что модифицирование электровзрывным методом стали 5XНМ и стали X12MФ способствует повышению микротвердости и износостойкости материала, что особенно ярко выражено в случае стали X12MФ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60032 мол_а_дк и при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1118.2017.2.