

- [10] S h m a t o v M.L. // Preprint of A.F. Ioffe Phys. Tech. Institute. 1990. N 1483. P. 1-20.
- [11] Ж е р и х и н А.Н., К о ш е л е в К.Н., Л е т о х о в В.С. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. № 1. С. 152-156.
- [12] D u g u a y M.A. // Phys. of Quant. Electron. 1976. V. 3. P. 557-579.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
28 декабря 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 5

12 марта 1991 г.

05.1; 10

© 1991

МЕХАНИЗМ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

В.И. И т и н, И.С. К а ш и н с к а я,
С.В. Л ы к о в, Г.Е. О з у р,
Д.И. П р о с к у р о в с к и й, В.П. Р о т ш т е й н

Структурно-фазовые превращения, происходящие в поверхностных слоях металлических материалов при облучении импульсными концентрированными потоками энергии и приводящие к их существенному упрочнению, определяются динамикой возбуждаемых в мишени тепловых полей и поли механических напряжений [1-3]. При увеличении числа импульсов происходит дополнительное изменение структуры и свойств зоны воздействия по сравнению с однократным облучением. Предполагалось [4], что эти изменения обусловлены процессами аддитивного накопления дефектов при циклическом воздействии тепловых полей и волн напряжений. Нами обнаружено, что при многократном облучении сталей низкоэнергетичным сильноточным электронным пучком (НСЭП) формирование упрочненного слоя происходит в результате циклического воздействия волн напряжений и возникающего при таком воздействии квазистатического поля остаточных напряжений.

Эксперименты проводили на образцах из углеродистых (Ст. 45, У7А, У12) сталей, находящихся в исходном или предварительно закаленном состояниях. Образцы облучали НСЭП, формируемым в электронной пушке с взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом [5]. Параметры пучка: длительность импульса $t_{\mu} = 0.15-1.2$ мкс, средняя энергия электронов $eU = 10-20$ кэВ,

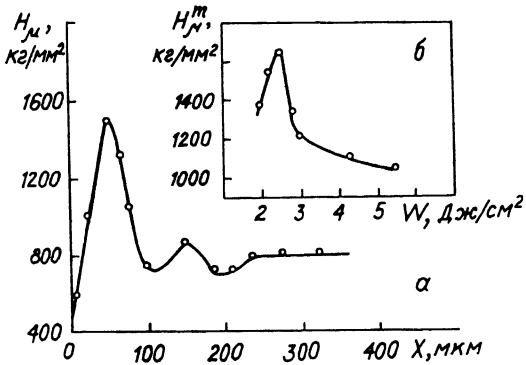


Рис. 1. а – распределение микротвердости по глубине зоны воздействия НСЭП для закаленной стали 45 при однократном облучении ($t_u = 0.7$ мкс, $W = 2.5$ Дж/см², $\Delta t = 15$ с); б – зависимость максимальных значений микротвердости H_{μ}^m от плотности энергии W ($t_u = 0.7$ мкс, $\Delta t = 15$ с, $N = 300$).

плотность энергии пучка $W = 0.6-6.0$ Дж/см². Свойства модифицированных слоев изучали с помощью рентгенофазового анализа и измерения микротвердости.

Установлено, что при однократном воздействии НСЭП в поверхностных слоях закаленных сталей со структурой мартенсита формируется упрочненный слой толщиной ~ 200 мкм с двумя характерными максимумами микротвердости H_{μ}^m (рис. 1, а). При этом максимальные значения H_{μ}^m существенно (в ~ 2 раза) превышают микротвердость закаленной стали. С увеличением числа импульсов N наблюдается постепенное увеличение значений H_{μ}^m . Максимальное упрочнение H_{μ}^m (1800 кг/мм² достигается при $W = 2.5$ Дж/см² (рис. 1, б). С ростом интервала времени между импульсами Δt значения H_{μ}^m уменьшаются, однако при этом увеличивается толщина упрочненного слоя (рис. 2). Степень упрочнения снижается по мере увеличения температуры предварительного отпуска сталей. Подобное аномальное упрочнение наблюдали ранее при воздействии на стали высокоэнергетичных СЭП (~ 200 кэВ, 60 нс, $\sim 10^8$ Вт/см²), причем степень упрочнения практически не зависела от предварительной термообработки образцов [3].

Численный расчет и прямые измерения с помощью термопар показали, что толщина зоны теплового влияния не превышает 15 мкм. Эти результаты хорошо подтверждаются данными рентгенофазового анализа, согласно которым повышенное содержание аустенита при закалке от высоких температур ($\sim 20\%$) наблюдается в слое толщиной до 10 мкм. Таким образом, общая толщина упрочненного слоя многократно превышает как глубину проникновения электронов

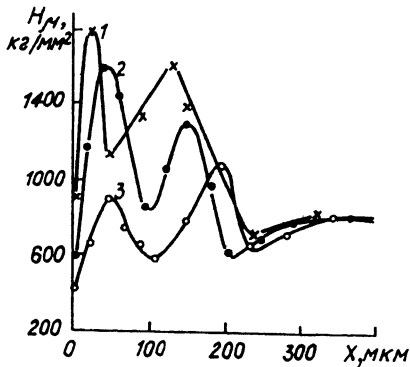


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине зоны воздействия НСЭП для закаленной стали 45 при различных интервалах между импульсами Δt : 1 - $\Delta t = 6$ с, 2 - $\Delta t = 15$ с, 3 - $\Delta t = 60$ с. ($t_u = 0.7$ мкс, $W = 2.2$ Дж/см², $N = 300$).

(~ 1 мкм), так и размеры зоны теплового влияния. Следовательно, сверхглубокое упрочнение, обнаруженное в настоящей работе, определяется воздействием на закаленную сталь волны напряжений.

С помощью методики, изложенной в [2] установлено, что при воздействии НСЭП волна напряжений имеет биполярный вид и состоит из импульсов сжатия и разрежения. Длительность каждого из импульсов соизмерима с длительностью пучка. Их амплитуда составляет 1–2.5 ГПа, то есть может превышать динамический предел текучести закаленных углеродистых сталей.

Анализ параметров волны напряжений показал, что решающее значение для упрочнения стали имеет структура ее профиля. Максимальное упрочнение достигается при воздействии на мартенсит биполярной волны, у которой амплитуды импульсов сжатия и разрежения близки по величине и превышают динамический предел текучести материала. При этом необходимо, чтобы амплитуда импульса разрежения достигала максимального значения. Эти условия реализуются при облучении в режиме, когда температура поверхности к концу импульса достигает температуры плавления $T_{пл}$. На рис. 1, б этому режиму соответствует плотность энергии $W = 2.5$ Дж/см². При $W = 2$ Дж/см² температура на поверхности не достигает $T_{пл}$, а, значит, амплитуда импульса разрежения не достигает максимального значения. Увеличение плотности энергии свыше 2.5 Дж/см² приводит к росту амплитуды импульса сжатия, тогда как амплитуда импульса разрежения из-за плавления поверхности и начала испарения уменьшается. При таком соотношении амплитуд степень упрочнения снижается.

Из рис. 2 видно, что форма кривых $H_{\mu}(x)$ зависит также от промежутка времени Δt между импульсами. Параметры

волны напряжения и характер теплового режима при этом не меняются. Следовательно, при многократном облучении существует еще один фактор, влияние которого на механизм формирования модифицированной зоны определяется величиной Δt . По нашему мнению, таким фактором является квазистатическое поле напряжений, формирование которого обусловлено особенностями циклического воздействия на мартенсит биполярных волн напряжений, представляющих собой знакопеременную нагрузку. Многократное воздействие такой нагрузки, как известно [6], может приводить к накоплению аномально большой анизотропной пластической деформации. При достижении определенной величины это поле, в свою очередь, начинает оказывать существенное влияние на закономерности взаимодействия волны с облучаемым материалом. С ростом числа циклов N уровень остаточных напряжений увеличивается, а в течение промежутков времени между импульсами Δt происходят процессы их релаксации. Это приводит к изменению вида кривых $H_{\mu}(x)$ в зависимости от Δt (рис. 2). С увеличением Δt процессы релаксации приводят к уменьшению величины напряжений и перераспределению их в более глубокие слои мишени. Это вызывает смещение пиков микротвердости от облученной поверхности, уменьшение максимальных значений H_{μ}^m и относительно более интенсивное упрочнение в пределах второго пика микротвердости.

Таким образом, нами обнаружено, что при облучении закаленных сталей НСЭП в поверхностном слое формируются две зоны упрочнения. При многократном облучении расположение и степень упрочнения этих зон определяются параметрами НСЭП и величиной промежутка времени между импульсами. Эффект сверхглубокого упрочнения обусловлен циклическим воздействием на мартенсит биполярной волны напряжений с определенной структурой профиля. Дополнительный вклад в формирование упрочненного слоя вносит квазистатическое поле остаточных напряжений.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Миркин Л.И. Физические основы обработки материалов лучами лазера. М.: МГУ, 1975.
- [2] Лыков С.В., Итин В.И., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И., Ротштейн В.П. // ДАН СССР. 1990. Т. 310. № 4. С. 858-861.
- [3] Итин В.И., Коваль Б.А., Коваль Н.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. 1985. № 6. С. 38-43.
- [4] Клэр А.Х., Холбрук Дж.Х., Фэйренд В.П. // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1984. С. 241-259.
- [5] Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т.14. В. 5. С. 413-416.

[6] П а н и н В.Е., Е л с у к о в а Т.Ф. // Синергетика и усталостное разрушение металлов. М., 1989. С. 113-138.

Институт сильноточной электроники
АН СССР, Томск

Поступило в Редакцию
8 февраля 1991 г.