

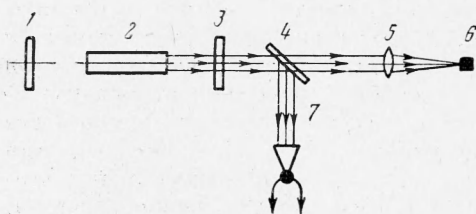
ДЕЙСТВИЕ ИНТЕНСИВНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ
НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛА

Т. М. Аверьянова, Л. И. Миркин, Н. Ф. Пилипецкий,
А. Р. Русталов
(Москва)

Исследуется действие светового луча квантового генератора (лазера) на металлы. Обнаружено, что в результате действия луча в металлах возникают кратеры. В районе кратера наблюдается значительное повышение твердости, в частности, для малоуглеродистой стали на 700 кг/мм^2 , что значительно превышает эффекты, которые можно наблюдать при других термических и механических воздействиях.

Среди современных методов упрочнения металлов важную роль играют методы импульсного взаимодействия. Так, например, по данным Райнхарта и Пирсона [1], при соударениях образцов из малоуглеродистой стали со стальной плитой при скоростях около 400 м/сек возможно повышение твердости стали на 130 кг/мм^2 . При скоростях соударения до 3000 м/сек это различие твердости существенно не меняется. Только при дальнейшем увеличении скорости и, следовательно, уменьшении времени воздействия на металл удается получить несколько большую разницу в твердости (220 кг/мм^2 при скорости 4000 м/сек). Следует отметить, что, начиная с некоторой предельной скорости соударения, на поверхности образцов возникает не упрочненная, а разупрочненная зона. Хорошо изученным способом упрочнения является закалка сталей и сплавов. Повышение температуры закалки в ряде случаев приводит к увеличению прочностных характеристик стали. Ниже исследуются возможности упрочнения металлов при действии очень коротких импульсов энергии.

В качестве источника импульсного воздействия использовался квантовый генератор света (лазер).

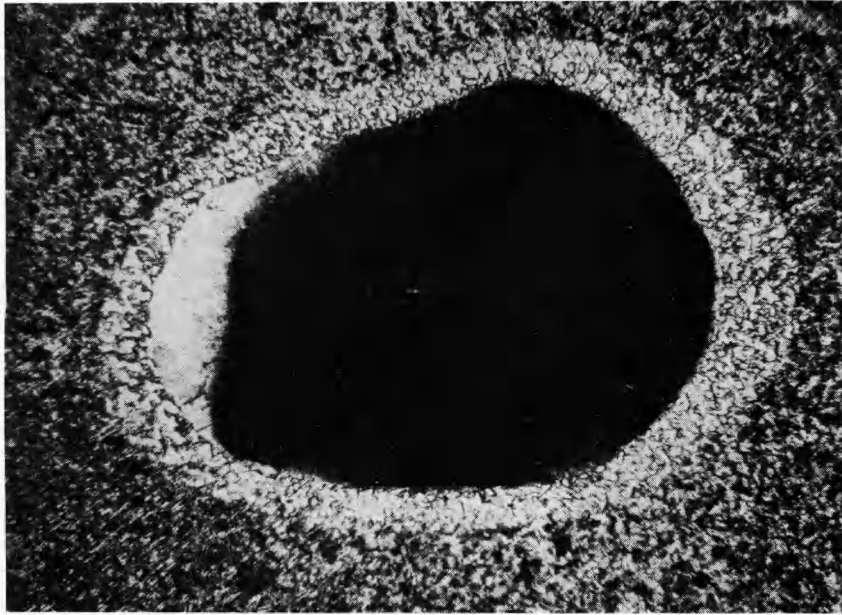


Фиг. 1. Принципиальная оптическая схема квантового генератора (лазера), использованного в работе. Обозначения: 1 — зеркало с коэффициентом отражения $R = 99\%$, 2 — кристалл рубина — источник монохроматического светового излучения, 3 — зеркало с коэффициентом отражения $R = 30\%$, 4 — плоско-параллельная стеклянная пластинка, 5 — линза, 6 — облучаемый образец, 7 — термодатчик

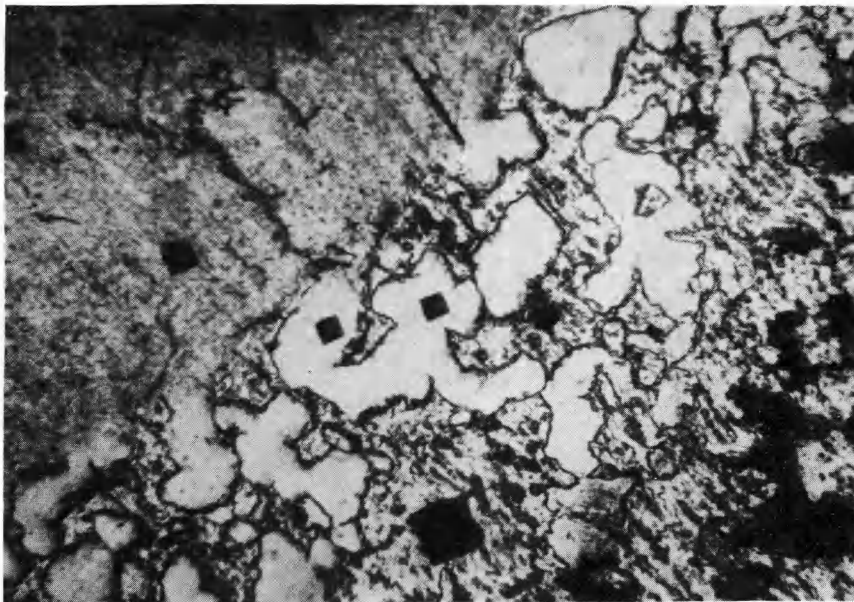
Схема применявшейся установки приведена на фиг. 1. Монохроматическое световое излучение от кристалла рубина (длина волны $\lambda = 6943 \text{ \AA}$) при помощи линзы фокусировалась на поверхность металлического образца. Режим работы лазера был обычным, т. е. без модуляции добротности резонатора. Для этого режима характерна многопиковая генерация, которая в использованной установке имела длительность примерно 500 мксек . Количество импульсов в течение одного выстрела достигало нескольких десятков (60—80) с длительностью каждого импульса $2\text{—}3 \text{ мксек}$. На фиг. 2 приведена осциллограмма излучения квантового генератора (длительность меток времени 100 мксек). Общая энергия излучения за один выстрел измерялась при помощи термодатчика, схематически показанного на фиг. 1, и составляла $1,4\text{—}1,6 \text{ Дж}$. Для «накачки»

рубинового кристалла применялись две лампы типа ИФП-2000.

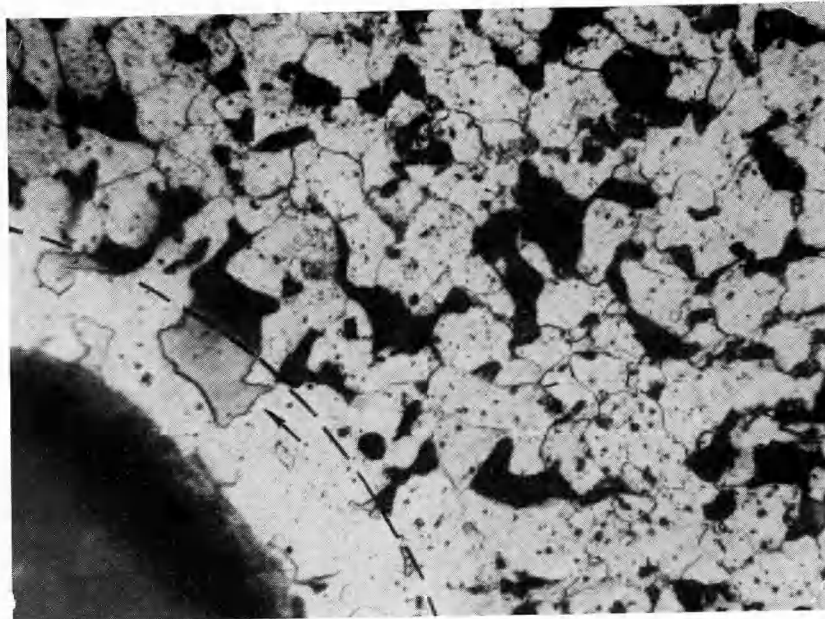
Исследовано воздействие луча лазера на армко-железо, малоуглеродистую сталь (сталь 10, $0,1\% \text{ C}$), высокоуглеродистые и высоколегированные стали, олово, дуралюмин. Получено, что световым луч с приведенными выше параметрами, направленный нормально к поверхности образца, приводит к образованию в металлах кратера глубиной около $1,5 \text{ мм}$ и диаметром около $1,5 \text{ мм}$. Проведенное металлографическое исследование показало, что в районе кратера в сталях можно выделить три зоны. Непосредственно к поверхности кратера прилегает плохо травящаяся зо-



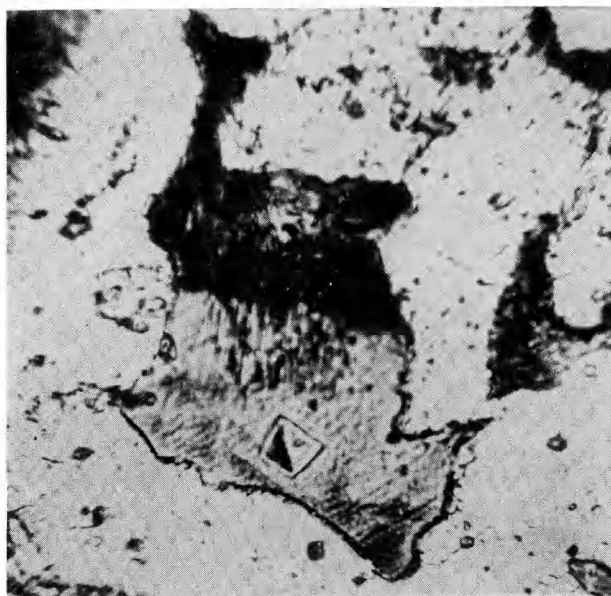
Фиг. 3. Микроструктура поверхности малоуглеродистой стали Ст. 10 после взаимодействия со световым лучом лазера, увеличение 70. Показаны зоны 1, 2, 3



Фиг. 4. Область у кратера в стали Ст. 10 $\times 450$. Видны зоны 1, 2 и 3 с отпечатками алмазной пирамиды прибора для измерения микротвердости. Все отпечатки сделаны с одной и той же нагрузкой $p = 50 \text{ г}$

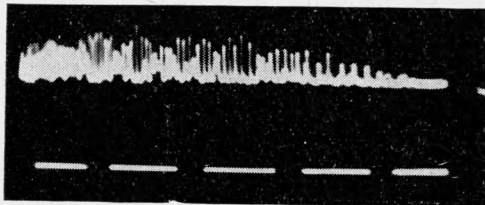


Фиг. 5. Четкая граница между исходной структурой и зоной, испытавшей действие лазерного луча



Фиг. 6. Перлитное зерно, разделенное на два участка с исходной и измененной структурой

на 1 с мелкоигольчатой, по-видимому, мартенситной структурой. Следующей является зона 2, содержащая белые, плохо поддающиеся травлению участки, состоящие из зерен сложной формы и, наконец, зона 3 с исходной структурой. На фиг. 3 приведена микрофотография кратера в малоуглеродистой стали при небольшом увеличении на которой видны все зоны. Для удобства воспроизведения эта фотография сделана не с поверхности образца, а после снятия слоя с поверхности и соответственного уменьшения диаметра кратера до 1 мм.



Фиг. 2. Оциллограмма излучения рубинового лазера (длительность меток времени 100 мксек)

Измерение микротвердости в отдельных зонах у поверхности образца показало, что, например, для малоуглеродистой стали, содержащей 0.1% С, исходный материал (или соответственно зона 3) состоит из ферритных зерен с твердостью $200 \pm 40 \text{ кг/мм}^2$ и перлитных зерен с твердостью $300 \pm 40 \text{ кг/мм}^2$. После действия светового луча лазера первая зона, ближайшая к кратеру, имеет твердость $1000 \pm 400 \text{ кг/мм}^2$. Таким образом, несмотря на внешнюю однородность зоны 1, свойства ее меняются в широких пределах и твердость ее очень велика. Вторая зона состоит из белых нетравящихся зерен с твердостью $1000 \pm 500 \text{ кг/мм}^2$. Несмотря на одинаковую твердость, структура белых зерен в зоне 2 и структура зоны 1, по-видимому, не одинаковы, так как в зоне 1 иногда выявляется игольчатая структура зерен, а в зоне 2 действие тех же травителей не выявляет игольчатой структуры. Кроме белых нетравящихся зерен, зона 2 содержит участки, имеющие внешний вид ферритных зерен, напоминающих зерна в зоне 3, но твердость этих ферритных зерен составляет $270 \pm 40 \text{ кг/мм}^2$ по сравнению с $200 \pm 40 \text{ кг/мм}^2$ в исходном материале. Микрофотография, полученная с большим увеличением, приведена на фиг. 4.

На фиг. 5 показана область около кратера в малоуглеродистой стали, сфотографированная с увеличением 450 раз. На микрофотографии четко видна граница между зоной с исходной структурой (зоной 3), состоящей из белых зерен феррита и черных зерен перлита, и зоной 2, в которой прошло превращение под действием луча, изменившее цвет бывших перлитных зерен. Такая же резкая граница наблюдается и между зоной 2 и зоной 1, расположенной у кратера и обладающей мелкоигольчатой структурой.

Резкость границы настолько велика, что ряд перлитных зерен оказываются разделенными на участки с исходной и измененной структурой.

Такое зерно, например, обозначено стрелкой на фиг. 5. На фиг. 6 приведена фотография того же зерна с увеличением 1500 раз. На зерно нанесены отпечатки алмазной пирамиды прибора для измерения микротвердости. Твердость темной части зерна равна 300 кг/мм^2 , что соответствует обычной твердости перлитных зерен, твердость более светлой части зерна превышает 1000 кг/мм^2 .

Существование таких резких границ, не наблюдаемых при обычных режимах нагрева, указывает на особые условия распространения тепловых волн в металлах при тепловых импульсах высокой интенсивности.

Таким образом, увеличение микротвердости малоуглеродистой стали при действии луча лазера составляет $700 \pm 400 \text{ кг/мм}^2$, т. е. в отдельных участках твердость может увеличиться на 1100 кг/мм^2 . Для сравнения укажем, что твердость феррита при пластической деформации с обжатием 90% увеличивается на 100 кг/мм^2 , а твердость малоуглеродистой

стали при закалке обычными методами увеличивается на 130 кг/мм^2 . Таким образом, увеличение твердости малоуглеродистой стали на 700 кг/мм^2 , наблюдаемое при действии луча лазера, не удается получить ни одним из обычных методов механической или термической обработки.

При исследовании комбинированных обработок, например термомеханического упрочнения, сочетающего динамическое обжатие и закалку, можно получить увеличение твердости малоуглеродистой стали на 250 кг/мм^2 [2], тот же порядок, как отмечалось выше, имеет повышение твердости при соударениях со скоростями до 4000 м/сек .

Можно предположить, что эффекты сильного упрочнения в малоуглеродистой стали связаны с чрезвычайно малым временем выделения тепловой энергии. Следует, однако, отметить, что в ферритных зернах в малоуглеродистой стали после действия луча лазера не наблюдаются двойники. В то же время при импульсных деформациях взрывом или соударением при комнатной и пониженных температурах наблюдается интенсивное двойникование. При импульсной деформации образцов, имевших повышенную температуру ($+700^\circ \text{C}$), двойники не образовывались, но наблюдались рекристаллизованные и деформированные зерна, не обнаруженные после действия луча лазера. Таким образом, по-видимому, нельзя свести эффекты, наблюдаемые при действии луча лазера, к чисто деформационным эффектам. Рассмотрим кратко результаты, полученные для других материалов. Для армко-железа повышение твердости в зоне у кратера не очень велико и составляет 80 кг/мм^2 (от 180 до 260 кг/мм^2), что примерно соответствует приросту твердости при обычной пластической деформации. Однако даже в армко-железе, содержащем всего $0.06\% \text{ C}$, обнаружены отдельные участки с твердостью 1100 кг/мм^2 . Высокоуглеродистая сталь У10, содержащая $1.0\% \text{ C}$, в исходном состоянии имела твердость $380 \pm 140 \text{ кг/мм}^2$, а в зоне действия луча лазера возникла структура с однородной твердостью 1000 кг/мм^2 . Таким образом, прирост твердости при упрочнении лучом лазера составляет в этой стали 600 кг/мм^2 , т. е. несколько меньше, чем в малоуглеродистой стали. В быстрорежущей стали, имеющей сложный химический состав и высокую исходную твердость ($430 \pm 50 \text{ кг/мм}^2$), твердость в зоне действия лазера равна всего $650 \pm 50 \text{ кг/мм}^2$, т. е. прирост твердости еще меньше. Таким образом, результаты исследования упрочненных металлов подтверждают выдвинутое ранее предположение, что относительное упрочнение металла в результате термической или механической обработки тем меньше, чем больше уровень прочности исходного материала, достигнутой путем введения легирующих элементов [3].

Исследование легкоплавкого металла — олова показало, что глубина кратера в нем значительно больше, чем в стали, и изменения в структуре и твердости в районе кратера отсутствуют. Для дуралюмина наблюдалось даже некоторое разупрочнение в зоне у кратера. Наконец следует отметить, что дуралюмин является единственным из исследованных материалов, у которого обнаружены трещины в районе кратера.

В заключение авторы благодарят Р. В. Хохлова за предоставленную возможность проведения экспериментов; Г. И. Баренблатта и И. М. Грязнова — за обсуждение результатов.

Поступила 31 VII 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Райнхарт Дж., Пирсон Дж. Поведение металлов при импульсных нагрузках. Изд. иностр. лит., 1960.
2. Гольдер Ю. Г., Грязнов И. М., Крапивин Л. Л., Миркин Л. И. Исследование термомеханического упрочнения углеродистых сталей при динамической деформации. Сб. «Исследования по высокопрочным сплавам и нитевидным кристаллам». Изд-во АН СССР, 1963, стр. 128.
3. Миркин Л. И. Об относительном упрочнении металлических сплавов при пластической деформации. Физика металлов и металловедение, 1959, т. 7, № 4, стр. 628.