

Aver'janova, T.M., L.I. Mirkin, N.F. Pilipeckij, A.R. Rustamov  
(Moskau):

Die Wirkung intensiver Lichtstrahlung auf die  
Oberfläche von Metall

Es wird die Wirkung eines Lichtstrahls eines Quantengenerators (Laser) auf Metall untersucht. Man stellte fest, daß durch die Lichteinwirkung in den Metallen Krater entstehen. Im Kraterbereich läßt sich eine deutliche Härtezunahme beobachten; dies trifft insbesondere für kohlenstoffarmen Stahl zu, bei dem die Härtezunahme  $700 \text{ kg/mm}^2$  beträgt, was die bei anderen thermischen und mechanischen Einwirkungen zu beobachtenden Effekte bei weitem übertrifft.

Unter den modernen Verfestigungsmethoden von Metallen spielen die Impuls-Wechselwirkungsverfahren eine wichtige Rolle. So ist z.B. nach den Angaben von Rajnchart und Pirson [1] beim Zusammenprall von kohlenstoffarmen Stahlwerkstücken mit einer Stahlplatte bei Geschwindigkeiten von ungefähr  $400 \text{ m/s}$  eine Härtezunahme des Stahls von  $130 \text{ kg/mm}^2$  möglich. Bei Aufprallgeschwindigkeiten bis zu  $3000 \text{ m/s}$  ändert sich dieser Härteunterschied nicht wesentlich. Erst bei weiterer Geschwindigkeitserhöhung und folglich kürzerer Einwirkungszeit auf das Metall gelingt es, eine etwas größere Härte­differenz ( $220 \text{ kg/mm}^2$  bei einer Geschwindigkeit von  $4000 \text{ m/s}$ ) zu erreichen. Es muß hierzu bemerkt werden, daß, wenn mit einer gewissen Maximalaufprallgeschwindigkeit begonnen wird, sich an der Werkstückoberfläche keine verfestigte, sondern eine entfestigte Zone bildet. Ein eingehend untersuchtes Verfestigungsverfahren ist die Härtung von Stahl und Legierungen. Die Erhöhung der Härtungstemperatur führt in einer Reihe von Fällen zur Vergrößerung der Festigkeitswerte von Stahl. Im folgenden werden Möglichkeiten der Metallverfestigung unter Einwirkung sehr kurzer Energieimpulse untersucht.

Als Impuls-Wirkungsquelle wurde ein Quanten-Lichtgenerator (Laser) benutzt. Das Schema der benutzten Anlage zeigt Abbildung 1. Die monochromatische Lichtstrahlung eines Rubin-

kristalls (Wellenlänge  $\lambda = 6943 \text{ \AA}$ ) wurde mit Hilfe einer Linse auf die Oberfläche des Metallwerkstücks fokussiert. Der Laser wurde auf herkömmliche Weise betrieben, d.h. ohne Modulation des Gütefaktors des Resonators. Charakteristisch für diese Betriebsweise ist die Vielfachsättigung, die in der benutzten Anlage eine Dauer von ungefähr  $500 \mu\text{s}$  hatte. Die Anzahl der Impulse betrug pro Beschuß 60 - 80; jeder Impuls hatte eine Dauer von 2 - 3  $\mu\text{s}$ . In Abbildung 2 ist das Strahlungsozillogramm des Quantengenerators dargestellt (Dauer der Zeitmarken  $100 \mu\text{s}$ ). Die gesamte Strahlungsenergie für einen Beschuß wurde mit Hilfe des in Abbildung 1 schematisch dargestellten Kalorimeters gemessen und betrug 1,4 - 1,6 Joule. Zum "Aufpumpen" des Rubinkristalls wurden zwei Lampen vom Typ IFP-2000 verwendet.

Es wurde die Einwirkung eines Laserstrahls auf Armco-Eisen, kohlenstoffarmen Stahl (Stahl 10, 0,1%C), kohlenstoffreichen und hochlegierten Stahl, Zinn und Duralumin untersucht. Dabei zeigte sich, daß ein im üblichen Verfahren auf die Werkstückoberfläche gelenkter Lichtstrahl mit den genannten Parametern in den Metallen zur Bildung von Kratern mit einer Tiefe von ungefähr 1,5 mm und einem Durchmesser von etwa 1,5 mm führt. Die metallographische Untersuchung ergab, daß man in den Stählen im Kraterbereich drei Zonen unterscheiden kann. Unmittelbar an die Krateroberfläche grenzt die schwer ätzbare Zone 1 mit einer feinen Nadelstruktur, offensichtlich einer Martensitstruktur. Es folgt Zone 2 mit weißen, schwer ätzbaren Feldern aus Körnern zusammengesetzter Form und zuletzt Zone 3 mit der Ausgangsstruktur. Abbildung 3 zeigt eine geringfügig vergrößerte Mikrophotographie eines Kraters in kohlenstoffarmem Stahl, auf der alle Zonen erkennbar sind. Um die Reproduktion zu erleichtern, wurde die Aufnahme nicht von der Oberfläche des Werkstücks, sondern nach Abtragung einer Schicht von der Oberfläche und entsprechender Verringerung des Kraterdurchmessers auf 1 mm gemacht.

Eine Messung der Mikrohärtigkeit in den einzelnen Zonen - durchgeführt an der Werkstückoberfläche - zeigte, daß z.B. für kohlenstoffarmen Stahl, der 0,1% C enthält, die Ausgangsmaterie (oder entsprechend Zone 3) aus Ferritkörnern mit einer Här-

te von  $200 \pm 40 \text{ kg/mm}^2$  und Perlitkörnern mit einer Härte von  $300 \pm 40 \text{ kg/mm}^2$  besteht. Nach Einwirkung des Laserlichtstrahls weist die dem Krater am nächsten gelegene erste Zone eine Härte von  $1000 \pm 400 \text{ kg/mm}^2$  auf. Somit ändern sich - ungeachtet der äußeren Homogenität der Zone 1 - ihre Eigenschaften innerhalb weiter Grenzen und ihr Härtegrad ist sehr hoch. Die zweite Zone besteht aus weißen nichtgeätzten Körnern mit einer Härte von  $1000 \pm 500 \text{ kg/mm}^2$ . Trotz des gleichen Härtegrads ist die Struktur der weißen Körner in Zone 2 und die Struktur von Zone 1 offensichtlich nicht die gleiche, da sich in Zone 1 gelegentlich eine Nadelstruktur der Körner zeigt, während in Zone 2 die Wirkung genau der gleichen Ätzmittel keine Nadelstruktur erzeugt. Neben den weißen ungeätzten Körnern enthält die Zone 2 Felder, die äußerlich wie Ferritkörner aussehen und an die Körner in Zone 3 erinnern; die Härte dieser Ferritkörner beträgt jedoch  $270 \pm 40 \text{ kg/mm}^2$  im Vergleich zu  $200 \pm 40 \text{ kg/mm}^2$  in der Ausgangsmaterie. Eine stark vergrößerte Mikrophotographie zeigt Abbildung 4.

Abbildung 5 zeigt den Kraterbereich in kohlenstoffarmem Stahl in 450facher Vergrößerung. Auf der Aufnahme ist die Grenze zwischen der Zone mit Ausgangsstruktur (Zone 3) aus weißen Ferritkörnern und schwarzen Perlitkörnern und Zone 2, in der sich unter der Lichteinwirkung eine die Farbe der früheren Perlitkörner abändernde Umwandlung vollzogen hat. Eine ebenso scharfe Grenze kann auch zwischen Zone 2 und Zone 1, die am Kraterrand liegt und eine feine Nadelstruktur aufweist, beobachtet werden.

Auf Grund der scharfen Grenze ist eine Reihe von Perlitkörnern in Felder mit Ausgangsstruktur und Felder mit veränderter Struktur geteilt.

Ein solches Korn ist z.B. in Abbildung 5 mit einem Pfeil markiert. Abbildung 6 zeigt die 1500fache Vergrößerung desselben Kornes. In das Korn ist die Diamantpyramide eines Mikrohärtemeßgeräts eingedrückt. Die Härte des dunklen Teils des Kornes beträgt  $300 \text{ kg/mm}^2$ , was der üblichen Härte von Perlitkörnern entspricht; die Härte des helleren Teils des Kornes übersteigt  $1000 \text{ kg/mm}^2$ .

Das Vorhandensein dieser scharfen Grenzen, die bei den üblichen Erwärmungsweisen nicht zu beobachten sind, weist auf die besonderen Ausbreitungsbedingungen von Wärmewellen in Metallen bei Wärmeimpulsen großer Intensität hin.

Die Erhöhung der Mikrohärtigkeit von kohlenstoffarmem Stahl beträgt also bei Wirkung eines Laserstrahls  $700 \pm 400 \text{ kg/mm}^2$ , d.h. in einzelnen Feldern kann die Härte um  $1100 \text{ kg/mm}^2$  erhöht werden. Zum Vergleich weisen wir darauf hin, daß sich die Härte von Ferrit bei plastischer Formänderung mit einer Verformung von 90% um  $100 \text{ kg/mm}^2$  erhöht und die Härte von kohlenstoffarmem Stahl bei der üblichen Härtung um  $130 \text{ kg/mm}^2$  zunimmt. Also kann eine Verstärkung des Härtegrades von kohlenstoffarmem Stahl um  $700 \text{ kg/mm}^2$ , wie sie bei der Wirkung eines Laserstrahls erzielt wird, mit keinem der üblichen mechanischen oder thermischen Behandlungsverfahren erreicht werden.

Bei der Untersuchung kombinierter Behandlungsverfahren, z.B. thermomechanischer Verfestigung - die dynamische Verformung und Härtung verbindet - erhält man eine Härtezunahme von  $250 \text{ kg/mm}^2$  in kohlenstoffarmem Stahl [2]; die gleiche Größenordnung weist - wie oben dargelegt wurde - die Härtezunahme bei Aufprallgeschwindigkeiten bis zu  $4000 \text{ m/s}$  auf.

Man könnte annehmen, die starken Verfestigungseffekte in kohlenstoffarmem Stahl ständen im Zusammenhang mit äußerst kurzen Zeitspannen der Wärmeenergieauslösung. Es muß jedoch betont werden, daß in Ferritkörnern in kohlenstoffarmem Stahl nach Einwirkung eines Laserstrahls keine Zwillingskristalle festgestellt werden, während sich bei Impulsverformungen durch Explosion oder Aufprall bei Zimmertemperatur oder niederen Temperaturen eine intensive Zwillingsbildung beobachten läßt. Bei Impulsverformung von Werkstücken mit Hochtemperaturen ( $+700^\circ \text{ C}$ ) bildeten sich keine Zwillingskristalle; es konnten jedoch rekristallisierte und verformte Körner beobachtet werden, die nach Wirkung des Laserstrahls nicht entdeckt wurden. Also darf man die bei der Wirkung eines Laserstrahls zu beobachtenden Effekte offensichtlich nicht auf reine Verformungseffekte zurückführen. Betrachten wir kurz die Ergebnisse, die wir für die anderen Stoffe erhalten haben. Für Armco-Eisen ist der Härteanstieg in der Kraterzone nicht sehr groß; er be-

trägt  $80 \text{ kg/mm}^2$  (von  $180$  auf  $260 \text{ kg/mm}^2$ ), was ungefähr der Härtezunahme bei der üblichen plastischen Verformung entspricht. Es wurden jedoch sogar in Armeo-Eisen, das nur  $0,06\% \text{ C}$  enthält, einzelne Felder mit einer Härte von  $1100 \text{ kg/mm}^2$  festgestellt. Der kohlenstoffreiche Stahl Y10, der  $1,0\% \text{ C}$  enthält, besaß im Grundzustand eine Härte von  $380 \pm 140 \text{ kg/mm}^2$ ; in der Einwirkungszone des Laserstrahls entstand jedoch eine Struktur mit der homogenen Härte von  $1000 \text{ kg/mm}^2$ . Die Härtezunahme bei Verfestigung mit einem Laserstrahl beträgt folglich in diesem Stahl  $600 \text{ kg/mm}^2$ , d.h. etwas weniger als in kohlenstoffarmem Stahl. In Schnellarbeitsstahl, der eine komplizierte Zusammensetzung und eine hohe Ausgangshärte aufweist ( $430 \pm 50 \text{ kg/mm}^2$ ), beträgt die Härte in der Wirkungszone des Lasers insgesamt  $650 \pm 50 \text{ kg/mm}^2$ , d.h. die Härtezunahme ist noch geringer. Somit bestätigen die Untersuchungsergebnisse von verfestigten Metallen die früher aufgestellte Hypothese, daß die relative Verfestigung des Metalls durch Wärmebehandlung oder mechanische Behandlung umso geringer ist, je höher das durch Legierungszusätze erreichte Festigkeitsniveau der Ausgangsmaterie ist [3].

Die Untersuchung eines leichtschmelzenden Metalls - Blei - ergab, daß dort die Kratertiefe bedeutend größer war als in Stahl und Struktur- und Härteveränderungen im Kraterbereich ausbleiben. Für Duralumin ließ sich sogar eine gewisse Entfestigung in der Kraterzone beobachten. Schließlich muß noch erwähnt werden, daß Duralumin das einzige unter den untersuchten Metallen ist, bei dem Risse im Kraterbereich festgestellt wurden.

Abschließend danken die Autoren R.V. Chochlov dafür, daß er ihnen die Durchführung der Versuche ermöglichte; sie danken G.I. Barenblatt und I.M. Grjaznov für die Diskussion der Ergebnisse.

Eingegangen am 31. 7. 1965

- A b b i l d u n g 1. Optisches Prinzipschaltbild des Quantengenerators (Laser), der in der Arbeit benutzt wurde. Bezeichnungen: 1 - Spiegel mit dem Reflexionskoeffizienten  $R = 99\%$ , 2 - Rubinkristall, Quelle monochromatischer Lichtstrahlung, 3 - Spiegel mit dem Reflexionskoeffizienten  $R = 30\%$ , 4 - planparallele Glasscheibe, 5 - Linse, 6 - bestrahltes Werkstück, 7 - thermischer Kalorimeter.
- A b b i l d u n g 2. Strahlungssoszillogramm eines Rubin-Lasers (Dauer der Zeitmarken 100 Mikrosekunden)
- A b b i l d u n g 3. Mikrostruktur der Oberfläche von kohlenstoffarmem Stahl St. 10 nach Wechselwirkung mit einem Laser-Lichtstrahl, 70fach vergrößert. Zu sehen sind die Zonen 1, 2 und 3.
- A b b i l d u n g 4. Kraterbereich in Stahl St. 10, 450fach vergrößert. Zu erkennen sind die Zonen 1, 2 und 3 mit Eindrücken der Diamantpyramide eines Mikrohärtemeßgeräts. Alle Eindrücke entstanden bei der gleichen Belastung von  $\tau = 50 \text{ p ?}$
- A b b i l d u n g 5. Deutliche Grenze zwischen der Ausgangsstruktur und der Zone mit Laserstrahleinwirkung.
- A b b i l d u n g 6. Perlitkorn, in zwei Felder mit Ausgangsstruktur und veränderter Struktur geteilt.

L i t e r a t u r

1. R a j n c h a r t , Dž., Dž. Pirson: Povedenie metallov pri impul'snyh nagruzkach. Izd. inostr. lit., 1960
2. G o l ' d e r , Ju.G., I.M. Grjaznov, L.L. Krapivin, L.I. Mirkin: Issledovanie termomechaničeskogo upročnenija uglerodistych stalej pri dinamičeskoj deformaciji. Sb. "Issledovanija po vysokopročnym splavam i nitevidnym kristallam". Izd-vo AN SSSR, 1963, S. 128
3. M i r k i n , L.I.: Ob odnositel'nom upročnenii metalličeskich splavov pri plastičeskoj deformaciji. Fizika metallov i metallovedenie (1959) t. 7, Nr 4, str. 628

Stgt., den 17.5.1968

i. A.

M. Wapenknecht

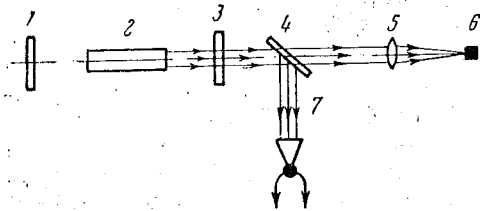
## ДЕЙСТВИЕ ИНТЕНСИВНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛА

Т. М. Аверьянова, Л. И. Миркин, Н. Ф. Филиппецкий,  
А. Р. Рустамов  
(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  $700 \text{ кг/мм}^2$ , 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  $400 \text{ м/сек}$  возможно повышение твердости стали на  $130 \text{ кг/мм}^2$ . При скоростях соударения до  $3000 \text{ м/сек}$  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 предельной скорости соударения, на поверхности образцов возникает не упрочненная, а разупрочненная зона. Хорошо изученным способом упрочнения является закалка сталей и сплавов. Повышение температуры закалики 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). Схема применявшейся установки приведена на фиг. 1.



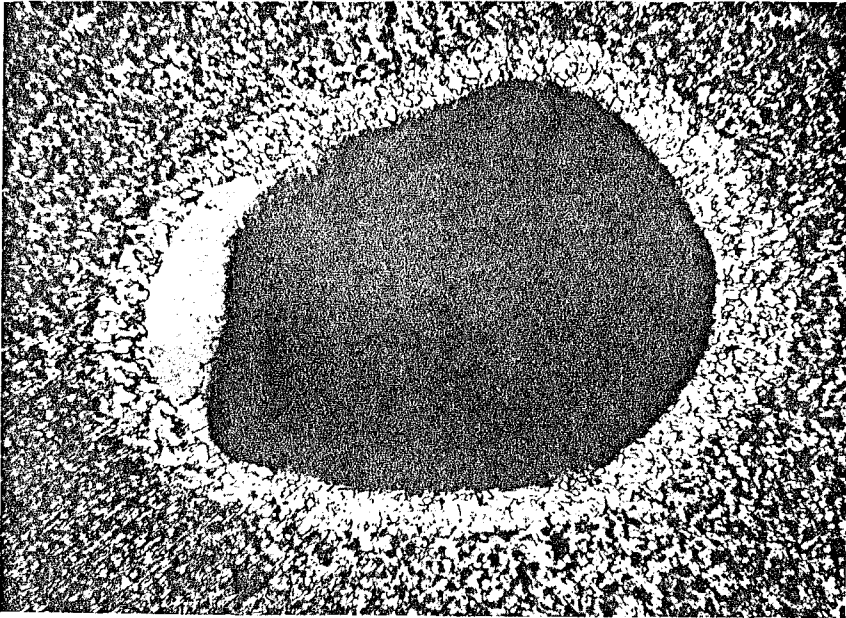
Фиг. 1. Принципиальная оптическая схема квантового генератора (лазера), использованного в работе. Обозначения: 1 — зеркало с коэффициентом отражения  $R = 99\%$ , 2 — кристалл рубина — источник монохроматического светового излучения, 3 — зеркало с коэффициентом отражения  $R = 30\%$ , 4 — плоско-параллельная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

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 многочиковая генерация, которая в использованной установке имела длительность примерно  $500 \text{ мксек}$ . Количество импульсов в течение одного выстрела достигало нескольких десятков (60—80) с длительностью каждого импульса 2—3 мксек. На фиг. 2 приведена осциллограмма излучения квантового генератора (длительность меток времени  $100 \text{ мксек}$ ). Общая энергия излучения за один выстрел измерялась при помощи термопарного калориметра, схематически показанного на фиг. 1, и составляла 1,4—1,6 дж. Для «накачки»

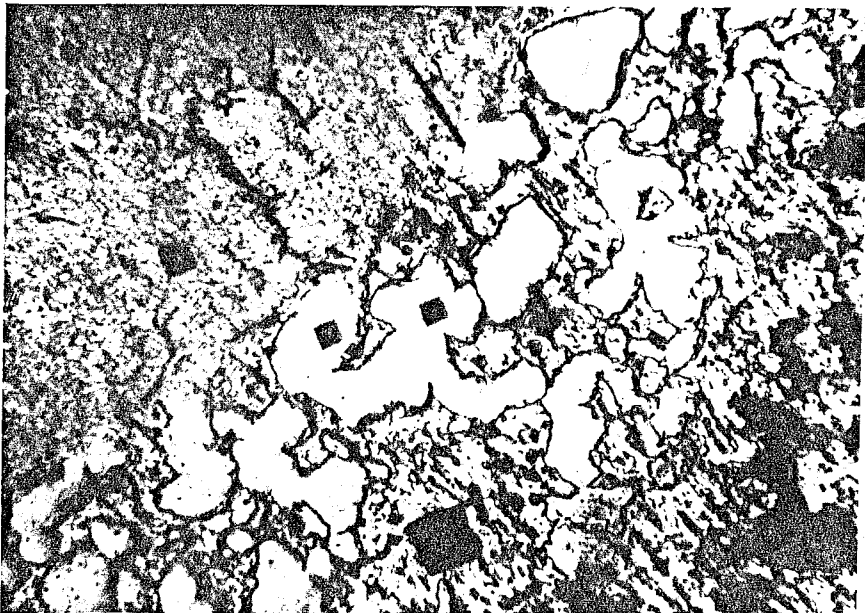
рубинового кристалла применялись две лампы типа ИФП-2000.

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

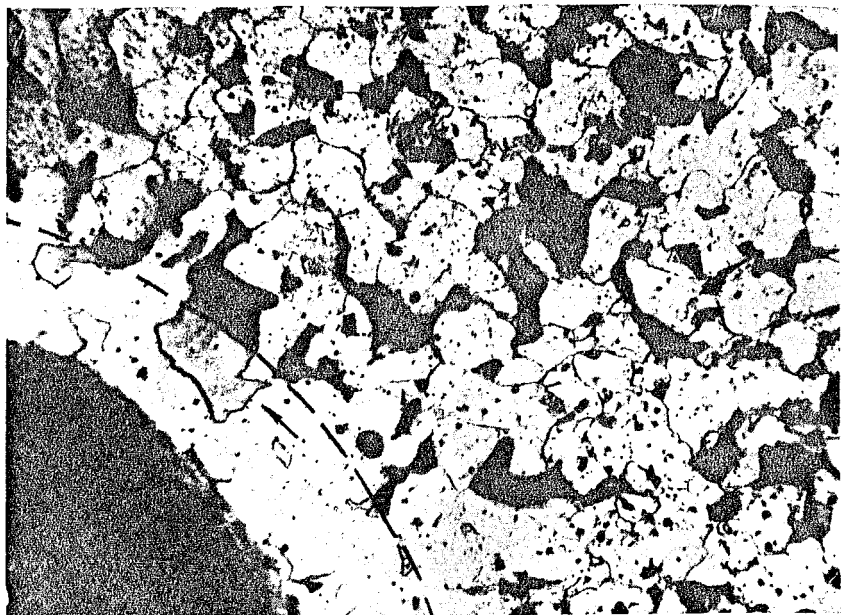




Фиг. 3. Микроструктура поверхности малоуглеродистой стали Ст. 10 после взаимодействия со световым лучом лазера, увеличение 70. Показаны зоны 1, 2, 3



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  $p = 50$  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.

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 негравящихся 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 негравящихся 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.

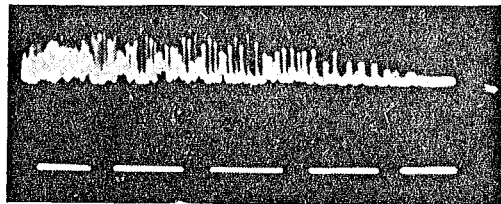
На фиг. 5 показана область около кратера в малоуглеродистой стали, сфотографированная с увеличением 450 раз. На микрофотографии четко видна граница между зоной с исходной структурой (зоной 3), состоящей из белых зерен феррита и черных зерен перлита, и зоной 2, в которой прошло превращение под действием 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  $300 \text{ кг/мм}^2$ , что соответствует обычной твердости перлитных зерен, твердость более светлой части зерна превышает  $1000 \text{ кг/мм}^2$ .

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  $1100 \text{ кг/мм}^2$ . Для сравнения укажем, что твердость феррита при пластической деформации с обжатием 90% увеличивается на  $100 \text{ кг/мм}^2$ , а твердость малоуглеродистой



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

стали при закалке обычными методами увеличивается на  $130 \text{ кг / мм}^2$ . Таким образом, увеличение твердости малоуглеродистой стали на  $700 \text{ кг / мм}^2$ , 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  $250 \text{ кг / мм}^2$  [2], тот же порядок, как отмечалось выше, имеет повышение твердости при соударениях со скоростями до  $4000 \text{ м / сек}$ .

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  $80 \text{ кг / мм}^2$  (от  $180$  до  $260 \text{ кг / мм}^2$ ), 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  $1100 \text{ кг / мм}^2$ . 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 возникала структура с однородной твердостью  $1000 \text{ кг / мм}^2$ . Таким образом, прирост твердости при упрочнении лучом лазера составляет в этой стали  $600 \text{ кг / мм}^2$ , 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.