

ни в течение 25-30 мин в 100-150 г/л водном растворе ангидрида молибдена; промывку выполняют в горячей проточной, а затем в холодной проточной воде.

Глава 7

УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Упрочнение методами лазерного воздействия

Лазерная закалка, проводимая с помощью оптического квантового генератора (лазера), перспективна для изделий, долговечность которых лимитируется износостойкостью и сопротивлением усталости, особенно если закалка другими методами затруднена вследствие сложности конфигурации детали и возможности ее значительного коробления при нагревании до закалочных температур.

Поверхностное упрочнение лучом лазера характеризуется рядом особенностей, позволяющих обеспечить: упрочнение локальных (по глубине и площади) объемов материала обрабатываемых деталей в местах их изнашивания (твердость упрочняемых участков может превышать на 15-20% и более твердость, достигаемую после термической обработки существующими способами); локальное упрочнение поверхностей труднодоступных углублений или полостей, в которые луч лазера может быть введен с помощью несложных оптических устройств; “пятнистое” поверхностное упрочнение значительных площадей деталей; заданную микрошероховатость упрочненных поверхностей; определенные физико-механические, химические и другие свойства поверхностей обрабатываемых деталей легированием их различными элементами с помощью лазерного излучения; отсутствие деформаций обрабатываемых деталей благодаря локальности термической обработки, что позволяет полностью исключить необходимость дополнительного финишного шлифования; простоту автоматизации процесса обработки лучом лазера по контуру, в том числе деталей сложной формы, так как лазерный нагрев осуществляется бесконтактно.

Лазерную обработку применяют для повышения стойкости деталей штампов, пресс-форм, режущего инструмента и деталей, имеющих рабочие поверхности, доступные для обработки лучом лазера, в том числе с использованием оптических и управляющих систем. Поверхностной лазерной обработке подвергают инструмент, прошедший термическую обработку, окончательное шлифование и заточку.

Лазерному упрочнению подвергают стали: углеродистые, низкоуглеродистые, легированные (У8А, У10А, 45, ХВГ, 9ХС и др.), высоколегированные (Х12, Х12М, Х12Ф, ХВГ, ХШ15, Х, 5ХВ2С), низкоуглеродистые цементованные (20, 12ХН3А), хромистые коррозионно-стойкие (4Х13), быстрорежущие (Р18, Р12, Р5, Р6М5, Р9).

Метод основан на использовании явления высокоскоростного разогрева металла под действием энергии лазерного луча до температур, превышающих температуру фазовых превращений A_{c1} , но ниже температуры плавления и последующего высокоскоростного охлаждения за счет отвода тепла с поверхности в основную массу металла. При обработке лазерным лучом, как и в случае обычной закалки, в стали образуются мартенсит и остаточный аустенит.

Твердость в зоне обработки повышается с 650-800 до 850-1100 HV, что обусловлено образованием в структуре более мелкозернистого мартенсита в результате быстрого нагрева и охлаждения. Глубина упрочненной зоны достигает 0,2 мм.

Лазерную обработку проводят в атмосфере воздуха или защитного газа (например, аргона). Шероховатость поверхности после лазерной закалки не изменяется. Средняя производительность термоупрочнения в аргоне до 500 мм²/мин, на воздухе – до 800 мм²/мин. Стойкость технологического инструмента увеличивается в 2 раза и более.

Критическими режимами лазерного упрочнения считаются те, при которых воздействие излучения оптического квантового генератора (лазера) не приводит к нарушению шероховатости поверхности, а глубина упрочненного слоя максимальна. При лазерном воздействии в режиме свободной генерации глубина упрочненного слоя

$$z \approx \sqrt{\alpha\tau},$$

где α – коэффициент температуропроводности; τ – длительность импульса лазерного воздействия.

С уменьшением τ уменьшается глубина z упрочненного слоя. Критическая энергия лазерной закалки снижается при уменьшении диаметра пятна закалки, что приводит к некоторому сокращению глубины упрочненного слоя. В ряде случаев (например, при упрочнении вырубных пуансонов диаметром 2-3 мм) требуется проводить лазерное упрочнение при разных диаметрах пятен закалки. Значения критической плотности энергии E лазерного излучения, глубины z упрочненного слоя для сталей некоторых марок при разных диаметрах пятен закалки, а также микротвердость до и после упрочнения приведены в табл. 1.

Выбор критической энергии лазерного излучения при обработке с разным диаметром пятна закалки проводят следующим образом. При фиксированном диаметре пятна закалки выполняют лазерную термообработку поверхности исследуемых образцов при различной энергии излучения лазера. Количество энергии, превышение которого приводит к нарушению шероховатости поверхности,

1. Режимы лазерной закалки инструментальных сталей

Марка стали	E, Дж					z, мкм					HV 100 исходная	HV 100 после упрочнения
	При диаметре пятна закалки, мм											
	2	3	3,6	4	4,5	2	3	3,6	4,0	4,5		
У8	9	23	31	41	54	108	117	126	132	136	708	1070
ХВГ	8	22	30	39	51	103	114	121	127	131	734	976
9ХС	8	21	29	37	49	98	112	117	124	129	708	1023
Х12М	7,5	20	28	35	46	91	103	112	115	118	764	934
Р6М5	7	18	26	32	43	82	91	103	107	113	794	871

считается *критическим*. Лазерную закалку чаще всего проводят в среде аргона, предохраняющего от обезуглероживания поверхность зоны лазерного воздействия. Для получения равномерного по глубине упрочненного слоя перед обработкой лазером поверхности детали подвергают травлению реактивом, содержащим: хлорного железа 10 г, соляной кислоты 15 см³, воды 15 см³. Затем упрочняемую деталь, имеющую ровный темно-серый цвет, устанавливают и фиксируют на столе механизма перемещения лазерной установки.

Оптимальное значение плотности энергии E , глубины z упрочненного слоя и микротвердости при лазерной закалке инструментальных сталей некоторых марок в воздушной и аргонной средах на установке «Квант-16» при площади пятна закали 0,1 см² приведены в табл. 2.

Плотность падающей энергии при лазерной закалке на воздухе меньше, чем в среде аргона. Это связано с тем, что нагрев металлов лазерным излучением на воздухе приводит к меньшему отражению света в результате дополнительного поглощения энергии образующейся оксидной пленкой. Шероховатость поверхности после лазерной закали в оптимальном режиме не ухудшается.

Лазерную закалку как окончательный вид обработки можно применять при изготовлении инструмента и деталей технологической оснастки для упрочнения их рабочих поверхностей в случае интенсивного изнашивания или имеющих протяженную кромку. Для лазерного упрочнения протяженных кромок инструмента и деталей технологической оснастки применяют способ 50%-ного перекрытия пятен закали, которое определяют как отношение разности диаметра D и шага S обработки к диаметру зоны лазерного воздействия:

$$K_n = \frac{D - S}{D}.$$

Коэффициент перекрытия пятен закали определяют как отношение шага S обработки к диаметру D зоны лазерного воздействия. Поперечное сечение зоны лазерного воздействия имеет форму сегмента. Глубина упрочненной зоны по диаметру пятна закали изменяется от 0 до z_{\max} .

При 50%-ном перекрытии пятен закали глубина упрочненной зоны практически одинакова по всей длине упрочненного слоя. Дальнейшее увеличение коэффициента перекрытия пятен закали нецелесообразно, так как уменьшается производительность обработки. Схема управления перемещением лазерного луча в пространстве при упрочняющей обработке приведена на рис. 33. Опти-

2. Режимы лазерной закали инструментальных сталей на установке «Квант-16»

Параметр режима	Закаливаемая сталь						
	У8	У10	9ХС	ХВГ	ШХ15	Х12	Х12М
$E_{\text{арг}}$, Дж/см ²	310	300	300	300	300	280	280
$E_{\text{возд}}$, Дж/см ²	200	190	190	190	190	180	180
$Z_{\text{арг}}$, мкм	125	120	120	120	120	105	105
$Z_{\text{возд}}$, мкм	135	130	130	130	130	115	115
Твердость поверхности после закали (HV 100)	1030	1000	980	1000	980	960	960

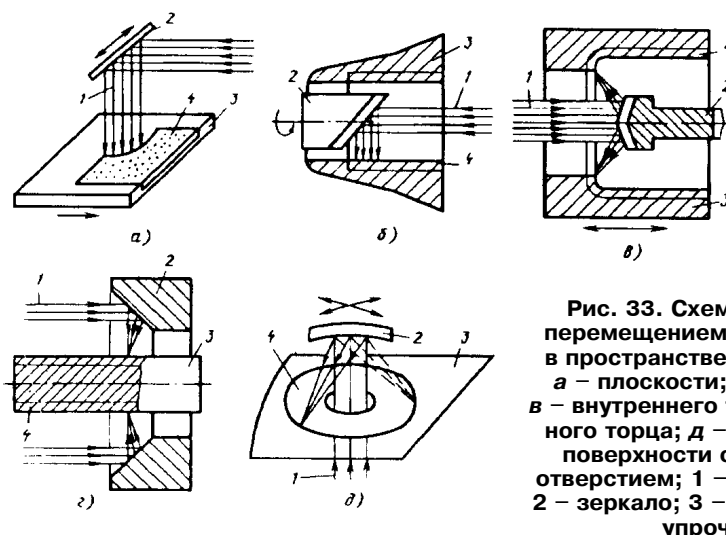


Рис. 33. Схемы управления перемещением лазерного луча в пространстве при обработке: а – плоскости; б – отверстия; в – внутреннего торца; г – наружного торца; д – криволинейной поверхности с центральным отверстием; 1 – световой поток; 2 – зеркало; 3 – деталь; 4 – зона упрочнения

мальные режимы упрочнения типовых инструментальных сталей на установке “Квант-18” даны в табл. 3.

Лазерное упрочнение стеллита. Ответственные детали, работающие в условиях повышенных и высоких давлений, агрессивных сред, газов и паров, отличающиеся малой площадью поверхности контакта, например клапаны, распределители, седла и другие детали трубопроводной арматуры из высокохромистых аустенитных сталей (например, 1X17H2, X18H10T), наплавляют кобальтовыми стеллитами. Различие значений коэффициента линейного расширения исключает возможность применения обычных видов термообработки, основанных на резком изменении температур (например, закалки), для повышения твердости и контактной прочности наплавленного материала, определяющей выбор лазера в качестве источника импульсного локального термического воздействия на наплавленный материал для его упрочнения.

3. Оптимальные режимы упрочнения инструментальных сталей на установке “Квант-18”

Сталь	Энергия излучения, Дж		Глубина упрочненного слоя, мм		Микротвердость HV 100	
	Обработка в среде				Исходная	Упрочненного слоя
	Воздуха *1	Аргона *2	Воздуха	Аргона		
45	106/71	104/72	160	140	560	890
У8	105/70	103/71	160	140	708	1023
ХВГ	100/67	98/67	150	130	730	976
Х12М	99/66	96/66	140	120	754	976
ШХ15	103/69	101/69	150	130	708	934

Размеры пятна контакта, мм:

*1 $D = 8$ – в числителе; 3×11 – в знаменателе;

*2 $D = 6$ – в числителе; 2×8 – в знаменателе

Наплавку стеллита ведут дуговым, кислородно-ацетиленовым или аргонодуговым методами. Наилучшее качество наплавленного стеллита достигается при аргонодуговой наплавке. Структура стеллита представляет собой твердый раствор на основе кобальта, расположенный на фоне эвтектики. Химический состав наплавленного стеллита, % (мас. доля): С 1,6-2,3; Si 1,5-2,5; Cr 26-32; Со 59-65; W 4-5; Fe – остальное. Наплавку стеллита проводят на детали, предварительно нагретые до 750-800 °С. Охлаждение наплавленных деталей выполняют медленно вместе с печью.

Предварительный подогрев и замедленное охлаждение вызваны разностью значений коэффициента линейного расширения наплаваемого металла и металла основы. Упрочненная зона шириной 0,6 мм образуется последовательными пятнами фокусирования лазерного облучения с перекрытием $0,75d$ (d – диаметр пятна), расположенными по контактной поверхности детали (например, по контактной окружности золотника трубопроводного клапана).

Оптимальные режимы лазерного упрочнения стеллита на установке типа СЛС-10-1: напряжение накачки $U_n = 980$ В, что соответствует энергии импульса $E = 8$ Дж, длительность импульса $\tau = 4$ мс, число импульсов в фокальном пятне $n = 1 \div 8$, фокусное расстояние фокусирующей оптики $F = 37$ мм, смещение поверхности образца относительно фокальной плоскости $\Delta F = 0,05 \div 0,1$, мм. При этих режимах обработки диаметр зоны проплавления составляет 0,4-0,6 мм. Лазерный нагрев приводит к повышению микротвердости на 210-240 НВ по сравнению с исходной структурой и увеличению твердости материала до 49-50 HRC при исходной твердости 40 HRC.

Комплексное лазерное и криогенное упрочнение стали выполняют последовательным лазерным нагревом (закалкой) упрочняемой поверхности и последующим охлаждением всей детали в среде жидкого азота или иного криоагента, обеспечивающего охлаждение до температуры, более низкой, чем температура мартенситного превращения. При криогенной обработке уменьшается содержание аустенита в поверхностном слое, что приводит к повышению микротвердости поверхностного слоя и уменьшению его изнашивания по сравнению с изнашиванием поверхностей лазерной закалкой. При комплексном применении лазерной закалки и криогенной обработки не происходит растрескивания образцов после их извлечения из жидкого азота, а также в процессе испытаний. Таким образом, применение комплексной обработки обеспечивает значительное повышение стойкости инструмента как для обработки резанием, так и для обработки давлением.

Комплексную лазерную закалку и криогенную обработку выполняют по оптимальным режимам, приведенным ранее. Твердость некоторых инструментальных сталей после термообработки по обычной схеме (закалка – отпуск), а также после дополнительного упрочнения лазером или комплексной лазерно-криогенной обработки приведен в табл. 4.

Комплексное лазерное и ультразвуковое упрочнение выполняют локальным нагревом зоны упрочнения лазерным лучом и ее последующей или совместной ультразвуковой обработкой (скоростная деформация и охлаждение). Объединение методов позволяет получать высокие скорости местного нагрева (10^{10} °С/с), охлаждения (10^6 - 10^8 °С/с) и деформации $\epsilon = 1400$ мм/с). Схема процесса показана на рис. 34.

Совместное действие температуры, давления и скоростного охлаждения приводит к возникновению мелкодисперсной структуры (“белого” слоя) в поверхно-

4. Микротвердость инструментальной стали после комплексного лазерно-криогенного упрочнения

Сталь	Микротвердость HV стали		
	исходная (после закалки и отпуска)	После лазерной закалки	После лазерной закалки и криогенной обработки
У12	734	976	1070
ХВГ	734	976	1119
Р6М5	834	934	1070

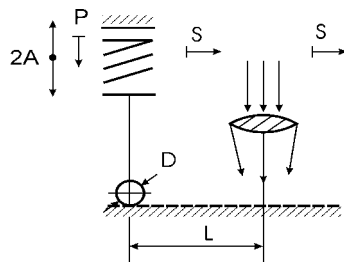


Рис. 34. Схема процесса комплексного лазерного и ультразвукового упрочнения

стном слое металла, отличающейся высокой микротвердостью. Так, если твердость после ультразвуковой обработки достигнет 400-450 HV 100, а после лазерной – 700-800 HV 100, то после лазерной и последующей ультразвуковой она может оказаться равной 800-950 HV 100. Совмещение методов позволяет получить еще большую твердость 1200-1300 HV 100 при исходной твердости 250 HV 100.

Сочетание высокой энергии импульса и скоростной деформации приводит к снижению шероховатости поверхности. С уменьшением

расстояния l ($l = 1,6$ мм) шероховатость поверхности снижается. Например, при исходной шероховатости $Ra = 0,63$ мкм значения шероховатости Ra равны, мкм: 2,5 после лазерной обработки (на указанных ниже режимах); 1 после лазерной и последующей ультразвуковой; 0,25 после совмещенной.

Комплексное лазерное и ультразвуковое упрочнение можно выполнить на следующих режимах: энергия импульса $E = 5 \div 10$ Дж; длительность импульса $\tau = 0,4 \div 7$ мс; диаметр пятна закалки 2-3 мм; частота механических колебаний $f = 20$ кГц; статическая сила $P = 10 \div 200$ Н; диаметр шара $d = 5 \div 10$ мм; подача $S = 0,1$ мм/дв. ход (0,1 мм/об); расстояние между центрами пятен контакта и закалки $l = 1,6 \div 2,8$ мм; скорость вращения (для тел вращения) $v = 35 \div 55$ м/мин; смещение инструмента $2A = 25 \div 30$ мкм; толщина упрочненной зоны (с зоной термического влияния) до 0,25-0,3 мм.

Упрочнение методами воздействия магнитным полем

Инструмент и обрабатываемый материал, взаимодействуя в процессе резания, образуют термопару, состоящую из взаимно перемещающихся разнородных элементов, каждый из которых обладает специфическими физико-механическими свойствами. В этих условиях разность температур, образующихся в зоне резания и вне ее, создает условия для возникновения электрического потенциала на разноименных концах инструмента и заготовки. Установлено, что появляющаяся термоЭДС оказывает влияние на процесс резания и эксплуатационную стойкость инструмента, особенно при обработке стали невысокой твердости, содержащей небольшое количество углерода и легирующих примесей.

Процессы, связанные с возбуждением термоЭДС в зоне резания, еще достаточно не изучены. Их проявления в общем виде сводятся к следующему.