ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.375.826

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ

А.А. БАРКУН, канд. техн. наук С.Ф. КУКИН, А.С. КУКИН
(РУП «Минский тракторный завод»);
д-р техн. наук О.Г. ДЕВОЙНО
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
д-р техн. наук, проф. В.С. ИВАШКО
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

Рассматривается система комплексного подхода к разработке технологии лазерного термоупрочнения, ее оптимизации с позиции экономии трудовых, материальных, энергетических ресурсов и повышения качества получаемых упрочненных поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов. Приводится анализ влияния на эффективность и качество процесса лазерного термоупрочнения таких факторов, как технически обоснованная глубина упрочненного слоя, микрогеометрия и шероховатость поверхности детали, подлежащей лазерной обработке, геометрическая форма пятна лазерного луча на обрабатываемой поверхности и закон распределения плотности энергии в нем, тип лазерной установки, коэффициент ее полезного действия преобразования потребляемой энергии в энергию оптического излучения, затраты на монтаж, эксплуатацию и техническое обслуживание, стабильность выходной оптической мощности излучения и длина волны лазерного излучения.

Введение. Основным преимуществом процесса лазерного термоупрочнения, определяющим его место среди широкого ряда методов поверхностного упрочнения, является возможность концентрации в локальной зоне поверхности высоких плотностей мощности, практически недостижимых другими методами, что позволяет достигать сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения тонкого поверхностного слоя и обеспечивать формирование за счет этого слоев сверхбыстрой закалки с повышенным комплексом свойств за счет высокой степени метастабильности структуры и проводить локальную обработку только рабочих поверхностей деталей без значительного их объемного разогрева.

Техническое применение данной технологии требует высокой степени ее воспроизводимости. Для достижения этой цели в настоящее время применяется активный контроль как качества обработки, так и, по возможности, всего процесса. Неоднородности на обрабатываемой поверхности (окисные пленки, загрязнения, следы обработки) и колебания выходной мощности даже около 5 % достаточны, чтобы получить неоднородное качество обработки поверхности. Для уменьшения этих эффектов необходимо управлять воздействием луча на обрабатываемую поверхность с высокими временными и пространственными разрешениями.

В настоящее время в промышленности для процесса лазерного термоупрочнения в основном используются схема закалки с помощью расфокусированного пятна лазерного луча, находящегося в поступательном движении. При использовании схемы закалки с помощью расфокусированного луча достигается баланс между мощностью излучения, площадью расфокусированного луча и скоростью перемещения, при которой достигается закалка поверхности металла. Поперечное сечение зоны закалки в данном случае по форме отражает распределение интенсивности излучения по сечению луча. Преимуществом этого метода является простота. Для увеличения ширины обрабатываемой зоны обработку ведут несколькими проходами с перекрывающимися полосами. В зонах перекрытия могут образовываться отпущенные зоны с пониженной твердостью, и это не позволяет получить однородную глубину закалки. Микрорельеф обработанной поверхности имеет вид, представленный на рисунке 1 – при обработке без оплавления поверхности, а на рисунке 2 – с оплавлением поверхности.

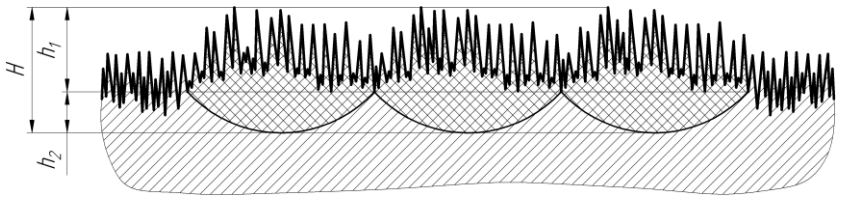


Рис. 1. Микрогеометрия поверхности и профиль зоны упрочнения при лазерной обработке без оплавления поверхности

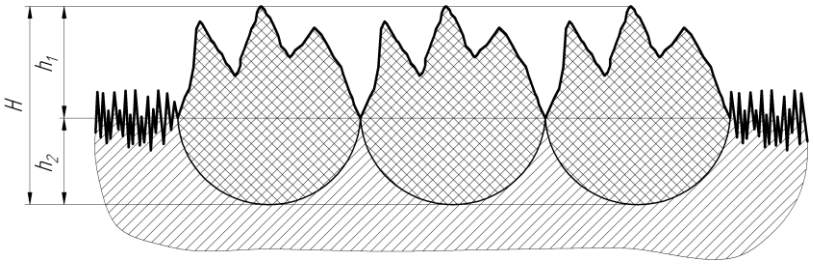


Рис. 2. Микрогеометрия поверхности и профиль зоны упрочнения при лазерной обработке с оплавлением поверхности

Как видно из рисунка 1, лазерная обработка без оплавления поверхности не изменяет исходную шероховатость поверхности, а только формируется соответствующая волнистость профиля. Обработка с оплавлением поверхности (см. рис. 2) изменяет исходную шероховатость поверхности и формирует волнистость профиля. В обоих случаях формируется неравномерная по глубине зона закалки. Это требует введения после лазерной обработке доводочных операций по устранению наведенной волнистости профиля и снятием поверхностного слоя толщиной h_1, что требует дополнительных трудозатрат, материальных и энергетических ресурсов. Кроме того, для получения относительно равномерной глубины упрочняемой зоны, необходимо производить обработку с перекрытием на половину следа лазерной обработки, что, однако, формирует упрочненный слой с неравномерной микротвердостью по его глубине и ширине.

Практика работы с излучением CO_2-лазеров показала, что лазерное термоупрочнение металлов без оплавления поверхности практически невозможно без использования специальных методов подготовки поверхностей с целью повышения их поглощательной способности [1]. Это также требует дополнительных трудовых, материальных и энергетических ресурсов, связанных с нанесением, сушкой специальных светопоглащающих покрытий, а также их снятием после лазерной обработки.

В настоящее время с появлением мощных диодных и волоконных лазеров [2] с длиной волны излучения 0,8...0,9 и 1,07 мкм проблема повышения поглощательной способности лазерного излучения при обработке металлических поверхностей потеряла свою актуальность, так как поглощательная способность металлических поверхностей из железоуглеродистых сплавов при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм возрастает в среднем 5...6 раз по сравнению с излучением CO_2-лазеров [3]. В таблице 1 показано влияние видов предшествующей механической обработки поверхностей образцов из стали 35NCD16 на поглощательную способность при облучении лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм, 5,3...5,8 и 1,06 мкм.

Таблица 1

Влияние видов предшествующей механической обработки поверхностей образцов из стали 35NCD16 на поглощательную способность при облучении лазерным излучением

Вид обработки поверхности	Шероховатость поверхности, R_a	Поглощаемость энергии CO_2-лазера (λ = 10,6 мкм), %	Поглощаемость энергии CO_2-лазера (λ = 5,3...5,6 мкм), %	Поглощаемость энергии имп. лазера (λ = 1,06 мкм),%
Полировка	0,02	5,15...5,25	8,55...8,7	29,75...30,00
Шлифовка	0,21	7,45...7,55	12,85...12,95	38,90...40,10
Шлифовка	0,28	7,7...7,8	13,1...13,2	40,20...41,40
Фрезерование	0,87	5,95...6,05	10,15...10,35	33,80...34,20
Фрезерование	1,1	6,35...6,45	10,85...11,00	34,10...34,40
Фрезерование	2,05	8,1...8,25	13,5 ... 13,7	41,80...42,50
Фрезерование	2,93	11,6...12,1	19,85...20,6	52,80...53,20
Фрезерование	3,35	12,55...12,65	21,35...21,5	51,40...51,70
Пескоструйная обработка	1,65	33,85...34	42,4...42,8	68,20...68,40
Шлифовка + графитовое покрытие	–	74...76	77...78	88...92

Сравнительные характеристики основных параметров промышленных технологических лазеров представлены в таблице 2 [2].

Таблица 2

Сравнительные характеристики основных параметров промышленных технологических лазеров

Параметр	Требуемый диапазон для использования в промышленности	CO_2	YAG-Nd с ламповой накачкой	YAG-Nd с диодной накачкой	Диодные лазеры	Волоконные лазеры
Выходная мощность, кВт	1…30	1…30	1…5	1…4	1…4	1…50
Длина волны, мкм	как можно меньше	10,6	1,064	1,064 или 1,03	0,8…0,98	1,07
ВРР, мм × мрад	< 10	3…6	22	22	> 200	0,34…9
КПД, %	> 20	8…10	2…3	4…6	30…50	20…30
Дальность доставки излучения волокном	10…300	отсутствует	20…40	20…40	10…50	10..300
Стабильность выходной мощности	как можно выше	низкая	низкая	низкая	высокая	очень высокая
Занимаемая площадь, кв. м	как можно меньше	10…20	11	9	4	0,5
Стоимость монтажа, отн. ед.	то же	1	1	0,8	0,2	< 0,05
Стоимость эксплуатации, отн. ед.	«-»	0,5	1	0,6	0,2	0,13
Стоимость обслуживания, отн. ед.	«-»	1…1,5	1	4…12	4…10	0,1
Периодичность замены ламп или лазерных диодов, ч	как можно больше	–	300…500	2000…5000	2000…5000	> 50 000

Основными преимуществами использования лазерных установок на диодно-волоконных излучателях являются следующее:

- малая длина волны излучения не требует применения поглощающих покрытий;
- высокая гибкость за счет доставки излучения по гибкому волоконному кабелю в зону обработки;
- высокая мощность излучения и его качество, позволяющее использовать длиннофокусную фокусирующую оптику;
- высокий КПД при низких эксплуатационных расходах;
- высокая эффективность и качество лазерного термоупрочнения за счет возможности формирования оптимальной геометрии пятна лазерного луча на обрабатываемой поверхности и закона распределения плотности энергии в нем.

На рисунке 3 представлены сравнительные данные глубины упрочненного слоя и плотности энергии в пятне для различных форм распределения энергии лазерного луча [4].Очевидно, что квадратное пятно с равномерным распределением плотности энергии в нем наиболее экономично для использования в лазерном термоупрочнении и дает равномерный по глубине слой упрочнения. Круглое пятно с гауссовым распределением плотности энергии имеет наиболее худшие показатели по энергозатратам и качеству получаемого термоупрочненного слоя.

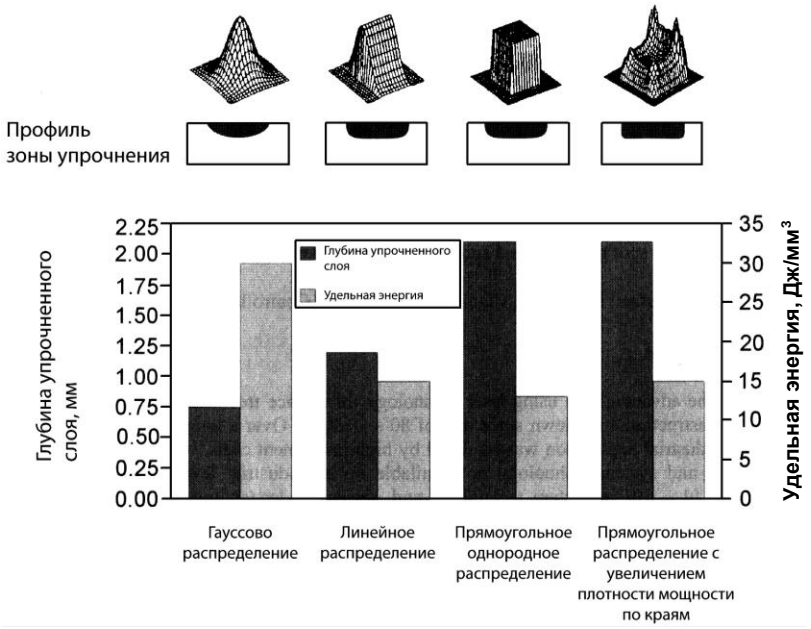


Рис. 3. Сравнительные данные глубины упрочненного слоя и плотности энергии в пятне для различных форм распределения энергии лазерного луча [6]

На современном этапе развития лазерной техники технологии и методы управления и контроля за процессами лазерной обработки позволяют производить лазерное термоупрочнение на финишной стадии изготовления детали с оптимальными трудовыми, материальными и энергетическими затратами.

Постановка задачи. К созданию оптимальной технологии лазерного термоупрочнения необходимо подходить всесторонне и комплексно с учетом многообразия факторов, влияющих на конечные результаты всего процесса в целом. К числу основных таких факторов следует отнести:

- технически обоснованную глубину упрочненного слоя;
- микрогеометрию и шероховатость поверхности, подлежащей лазерной обработке;
- геометрическую форму пятна лазерного луча на обрабатываемой поверхности и закон распределения плотности энергии в нем;
- тип лазерной установки, ее КПД преобразования потребляемой энергии в энергию оптического излучения, затраты на монтаж, эксплуатацию и техническое обслуживание, качество лазерного излучения и его длину волны.

Обоснование необходимой глубины упрочненного слоя. Обоснование глубины упрочненных слоев, получаемых лазерным термоупрочнением деталей из железоуглеродистых сплавов, производится на основании анализа контактно-силового взаимодействия сопрягаемых поверхностей деталей, расчета возникающих при этом взаимодействии нормальных и касательных напряжений и прогнозирования соответствующих механических и физических свойств контактируемых поверхностей деталей конкретных узлов и механизмов, обеспечивающих необходимую долговечность и износостойкость [5].

В узлах и механизмах автотракторной техники, работающих в условиях значительных контактно-силовых нагрузок, наиболее частым употребляемым в настоящее время параметром является микротвердость, по величине которой судят в дальнейшем об износостойкости и долговечности.

Площадь лазерного термоупрочненного слоя условно можно разделить на четыре характерные зоны, различающиеся своими механическими свойствами, в частности твердостью и площадью.

Оценку значений необходимой твердости упрочненного лазером слоя металла при заданных максимальных значениях глубины изнашиваемой поверхности производят по усредненной твердости упрочненного металла, которую определяют по формуле:

$$T_{cp} = \frac{A_1T_1 + A_2T_2 + ... + A_iT_i + ... + A_nT_n}{A_1 + A_2 + ... + A_i + ... + A_n}, \quad (1)$$

где A_1, A_2, … A_i, …., A_n – площади поперечного сечения зоны упрочнения (мм^2) с соответствующими значениями твердости T_1, T_2, …, T_i, …, T_n.

Оптимизация режимов лазерной обработки на получение требуемой усредненной твердости материала в упрочненном слое позволяет экономить трудовые, материальные и энергетические ресурсы при отработке режимов лазерной обработки.

Влияние исходной микрогеометрии профиля и шероховатости поверхностей деталей, подвергаемых лазерной обработке. Шероховатость поверхности является одним из основных технологических параметров изделий, величина которой определяется технологическими требованиями и техническими условиями работы деталей. При термоупрочнении деталей из железоуглеродистых сплавов с использованием лазерного нагрева металла в зависимости от режимов упрочнения закалка может осуществляться из твердой фазы или с оплавлением поверхности. Лазерное упрочнение в твердой фазе позволяет осуществлять обработку практически без изменения шероховатости поверхности, полученной в результате предшествующей механической обработки детали.

С уменьшением исходной шероховатости глубина закаленного слоя (H) возрастает и достигает максимальных значений при минимальной величине шероховатости поверхности. Из анализа этих рассуждений можно сделать вывод, что предпочтительным способом предварительной механической обработки деталей при лазерном термоупрочнении является шлифование. Однако шлифование создает микрорельеф поверхности с очень малыми радиусами округления вершин микронеровностей, которые даже при обработке без оплавления поверхности могут частично оплавляться и таким образом изменить исходный микрорельеф.

В соответствии с динамикой процесса в результате приработки пластические деформации поверхностей в зонах контактов микронеровностей трансформируются в упругие, и в этом случае неравновесная шероховатость поверхностей переходит в равновесную. Известно, что при равновесной шероховатости поверхностей в подвижных сопряжениях наблюдаются минимально возможные силы трения, а также минимальный износ контактирующих поверхностей за счет увеличения опорной поверхности сопряженной пары трения, что является одним из факторов повышения эксплуатационных свойств изделия. В реальных

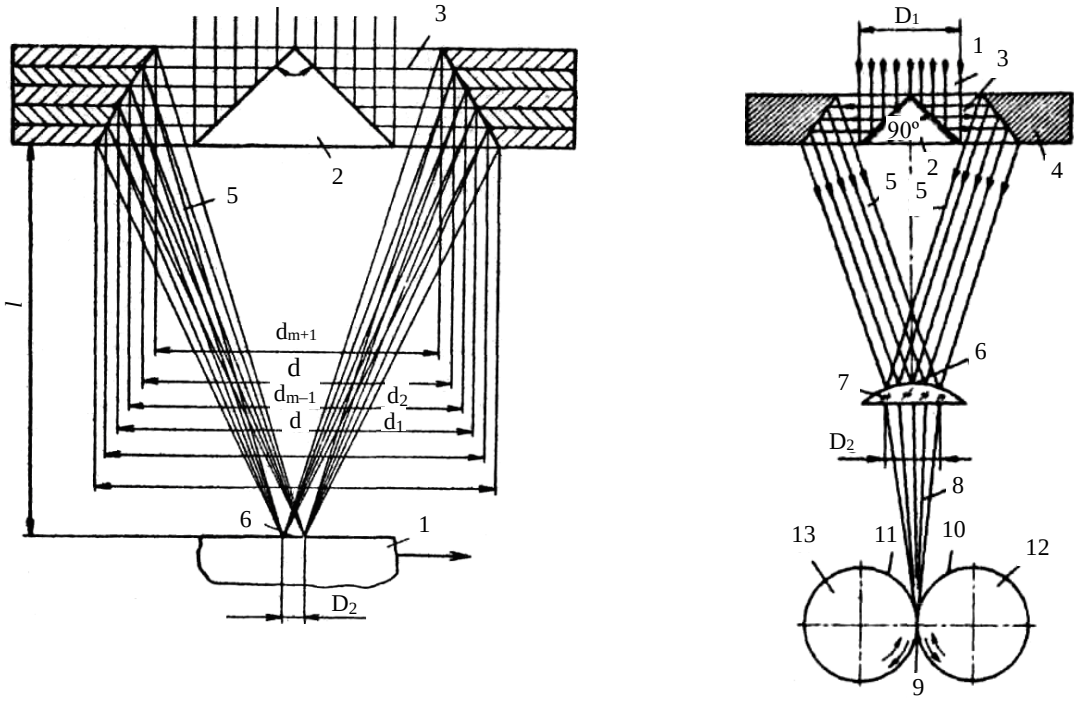
условиях взаимодействия контактирующих пар шероховатость поверхности оценивается высотой микронеровностей профиля поверхности *Rz*, средним шагом микронеровностей *Sa*, максимальной H_{max} и минимальной H_{min} высотой микронеровностей, средним радиусом скругления вершин микронеровностей ρ [6].

Как известно, ультразвуковым поверхностно-пластическим деформированием получают поверхности с минимальной шероховатостью *Ra* = 0,13...0,2 – для стали, *Ra* = 0,5 – для чугуна, и наибольшей опорной поверхностью за счет формирования микрорельефа с большим средним радиусом скругления вершин микронеровностей ρ. Поэтому ультразвуковая поверхностно-пластическая обработка наиболее предпочтительна в сравнении с лазерной обработкой и особенно при лазерном термоупрочнении деталей из чугунов, так как обеспечивает более эффективное проникновение углерода в металлическую матрицу по бездиффузионному механизму, снижая его содержание в свободном виде, а также более интенсивное измельчение, выкрашивание и удаление графита, выходящего на поверхность, с последующей ликвидацией пор и пустот на месте бывших графитовых включений деформационного уплотнения. Это позволяет избежать микрооплавлений поверхности в зонах выхода частиц углерода на поверхность, который выгорает с образованием кратеров с оплавленными кромками даже в режиме обработки без оплавления поверхности.

Влияние геометрической формы пятна лазерного луча на обрабатываемой поверхности и закона распределения плотности энергии в нем на эффективность процесса и качество получаемых термоупрочненных слоев. В подавляющем большинстве всех применений лазерного термоупрочнения используется пятно лазерного луча в виде круга с гауссовым или близким к нему распределением плотности мощности. Недостатки использование круглого пятна с гауссовым распределением плотности мощности следующие:

- глубина упрочненного слоя максимальна по центру пятна и падает до минимума по краям;
- из-за неравномерности плотности энергии по пятну практически невозможно обеспечить режим обработки без оплавления поверхности (особенно на деталях из чугуна);
- обработку поверхностей деталей шириной свыше 5 мм необходимо производить несколькими проходами с дорожками, примыкающими друг к другу, или с частичным перекрытием, что вызывает частичный отпуск металла в зонах перекрытия и формирование волнистого профиля поверхности зоны обработки.

Для CO_2-лазеров с гауссовым распределением энергии по сечению луча с целью устранения недостатков, указанных выше, предлагались специальные оптические схемы на основе металлической оптики, преобразующие нормальное распределение в равномерное (рис. 4).



а) б)

Рис. 4. Оптические схемы преобразования лазерного излучения с нормальным распределением плотности мощности по сечению лазерного луча в равномерное в пятне лазерного луча на обрабатываемой поверхности: а – пятно в виде круга; б – пятно в виде линии

Очевидная сложность данных оптических систем при изготовлении, потери излучения и необходимостью специального и постоянного охлаждения элементов металлооптики явились тормозящим фактором к их более широкому распространению.

Стремление разработчиков получить равномерное распределение интенсивности энергии по сечению луча обусловлено необходимостью получения равномерного распределения температуры по площади пятна и тем самым обеспечить одинаковые температурные условия по ширине следа лазерной обработки. В настоящее время для обеспечения постоянства температуры на облучаемой поверхности используют деформируемые и адаптивные зеркальные системы.

Как уже отмечалось выше, равномерное распределение плотности мощности в пятне на обрабатываемой поверхности повышает эффективность использования лазерной энергии в процессах упрочнения, а также обеспечивает получение равномерного по глубине упрочненного слоя. Кроме того, в современных лазерных установках на диодных и волоконных излучателях в оптическую головку встраиваются датчики для контроля температуры в пятне на обрабатываемой поверхности вблизи точки плавления, а соответствующей системой автоматического регулирования процесса обеспечивается закалка из твердого состояния с сохранением исходного микрорельефа поверхности.

Повышение эффективности процесса лазерного термоупрочнения при использовании равномерного распределения плотности мощности в зоне лазерного воздействия на обрабатываемую поверхность подтверждается теоретически при расчете температурных полей [7]. В данной работе показано, что при расчете и анализе температурных полей, создаваемых круглым пятном с гауссовым и равномерным распределением плотности мощности, требуемая глубина упрочненного слоя для равномерного распределения достигается на скорости обработки в 1,5 раза большей, чем для гауссового распределения. Однако при использовании круглого пятна даже с равномерным распределением плотности мощности в нем участки обрабатываемой поверхности при движении пятна имеют разное время взаимодействия с лазерным излучением, которое максимально по центру и минимально по краям следа лазерной обработки. Это не позволяет получать одинаковую температуру разогрева поверхности по ширине следа лазерной обработки, и как следствие, одинаковой глубины упрочненного слоя. В этой связи использование квадратного, прямоугольного или линейного пятна с равномерным распределением обеспечивают одинаковое время взаимодействия участков поверхности с лазерным излучением и формирование упрочненного слоя, равномерного по глубине, механическим свойствам и шероховатостью поверхности по всей ширине следа лазерной обработки.

На современном этапе развития лазерной техники и особенно с появлением мощных лазерных источников на диодно-волоконных излучателях формирование квадратного, прямоугольного или линейного пятна с равномерным распределением технически не вызывает затруднений, так как длина волны лазерного излучения, составляющая 0,8...1,07 мкм, позволяет использовать кварцевую стеклянную оптику для преобразования гауссового распределения в равномерное по принципу представленных на рисунке 4, на основе эффектов преломления световых пучков.

Высокая эффективность использования волоконных лазеров в процессах лазерной обработки подтверждается представленной на рисунке 5 совокупной стоимостью эксплуатации различных типов лазеров в течение 8-ми лет [8].

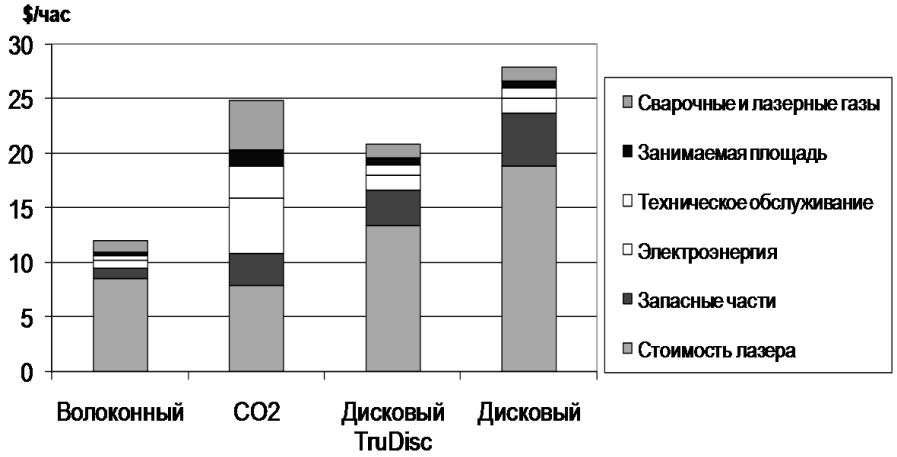


Рис. 5. Сравнительные данные по совокупной стоимости эксплуатации различных типов лазеров в США (срок эксплуатации 8 лет)

Качество лазерного излучения, характеризуемое параметром BPP, мм × мрад, (рис. 6) в зависимости от мощности, для волоконного лазера значительно выше, чем у CO_2-лазеров. Данное качество излучения волоконного лазера позволяет использовать длиннофокусную оптику, что значительно расширяет технологические возможности использования лазерного излучения в различных процессах лазерной обработки в машиностроении.

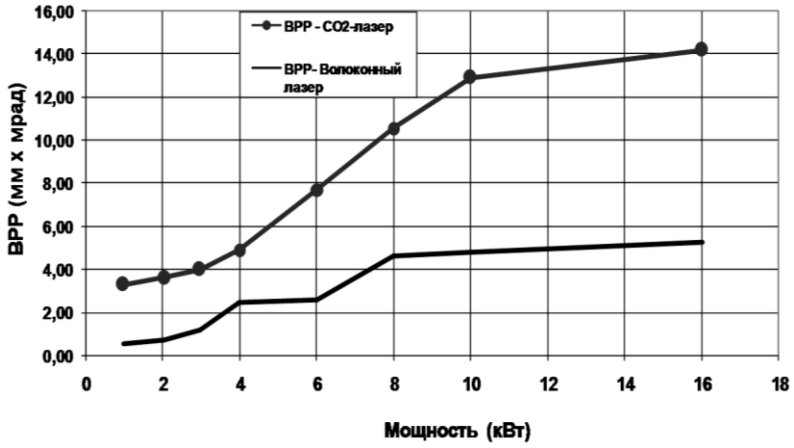


Рис. 6. Сравнительные данные зависимости параметра BPP
от мощности лазерного излучения для волоконного и CO_2-лазеров [8]

Выводы. Представленная система комплексного подхода к разработке технологии лазерного термоупрочнения, ее оптимизации с позиции экономии трудовых, материальных, энергетических ресурсов и повышения качества получаемых упрочненных поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов позволяет на высоком техническом и технологическом уровне решать сложные задачи поверхностного упрочнения разнообразных деталей на предприятиях машиностроительного профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закалка серых чугунов излучением CO_2-лазера / В.М. Андрияхин [и др.] // Автомобильная промышленность. – 1980. – № 7. – С. 25 – 26.
2. Минаев, В.П. Фирма и ее лидер. Ч. 2 / В.П. Минаев // Лазер информ: информ. бюл. лазерной ассоциации. – М., 2006. – № 8 (333).
3. Stern, G. Absorptivity of cw CO_2, CO and YAC-laser beams by different metallic alloys / G. Stern // Laser Treatment of Materials. ECLAT'90: Proc. 3d European Conf. 2 Vol.; eds. H.W. Bergmann, R. Kupfer. – 1990. – Vol. 1. – P. 25 – 35.
4. Hoffmann, P. Recent Developments of System Technology for Surface Treatment / P. Hoffmann, R. Dierken // Surface Treatment and Ablation: Proc. 5d European Conf. LANE 2007 2 Vol.; eds. M. Geiger, A. Otto, M. Schmidt, 2007. – Vol. 2. – P. 715 – 721.
5. Обоснование глубины упрочнения слоя металла лазерной обработкой / В.С. Ивашко [и др.] // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 8-го Междунар. науч.-техн. семинара. – Киев, 2008 – С. 85 – 88.
6. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1: Теоретические основы. – 400 с.
7. Оптимизация параметров процесса лазерного термоупрочнения посредством расчета создаваемых при лазерной обработке температурных полей / С.Ф. Кукин [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2008. – № 3. – С. 88 – 91.
8. Industrial Laser Solutions. Feb. 2005 & IPG Photonics.

Поступила 19.05.2008