

УДК 621.785.1

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВА СТАЛИ 45 С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ

Д.М. Гуцев¹, В.Г Кудрицкий¹, И.В. Царенко²

¹ Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

² Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Повышение износостойкости поверхностей трения традиционно остаётся одной из ключевых задач машиностроительных технологий. По известным данным значительная часть мощности машин расходуется на преодоление работы сил трения [1]. На сегодняшний день существует огромный арсенал технологий, направленных на повышение износостойкости: легирование специальными дорогостоящими материалами, объёмная или поверхностная ТВЧ закалка, наплавка высокотвёрдыми износостойкими материалами с последующей механообработкой, химико-термическая обработка, как, например, хромирование, азотирование или цементация поверхности и т.д. [2—4] Эти процессы широко известны, и в определённой степени повышают износостойкость и срок службы деталей. Однако они достаточно трудоёмки, энерго- и материалоемки, имеют продолжительный технологический цикл.

Одним из возможных вариантов повышения износостойкости быстроизнашивающихся участков поверхностей деталей является технология локального лазерного упрочнения, позволяющая повысить износостойкость и срок службы деталей без применения дорогостоящих расходных материалов, без необходимости трудоёмких и энергоёмких подготовительных и последующих доводочных операций [5—7].

Повышение износостойкости поверхности после лазерной закалки достигается за счёт структурно-фазовых изменений поверхностного слоя на глубину 0,3—1,0 мм без оплавления поверхности, без нарушения макро- и микрогеометрии поверхности детали. В случае оплавления поверхности глубина структурно-фазовых изменений может достигать 3,0 мм. Такая возможность обеспечивается за счёт заданного распределения плотности мощности в пятне излучения. Благодаря возможности локального упрочнения, высокой скорости обработки и автоматизации, лазерное поверхностное термоупрочнение отличается коротким технологическим циклом, относительно низкой удельной энерго-, трудо-материалоемкостью и, соответственно, низкой стоимостью.

Несмотря на многолетние исследования в области лазерного упрочнения поверхности и на сегодня остаётся актуальной задача оптимизации режимов лазерной обработки, изучения особенностей воздействия лазерного импульса на структуру поверхности и её свойства, [8–9].

Данная работа посвящена выработке технологического режима упрочнения стали 45 лазерной закалкой с целью повышения ее триботехнических характеристик.

Цель работы. Оценить влияние технологических параметров процесса лазерной обработки поверхности стали 45 на её триботехнические характеристики и разработке рекомендаций для получения максимальной износостойкости.

Материалы и методы исследований. Исследуемые образцы — шайбы диаметром 40 мм, толщиной 10 мм из стали 45с параметром шероховатости Ra 2,5.

Лазерную обработку проводили на экспериментальной технологической установке на базе твердотельного лазера TL-400 [10]. Лазерное излучение генерировалось в кристаллах алюмоиттриевого граната АИГ: Nd^{+3} . Длина волны излучения 1,064 мкм, максимальное значение средней мощности 400 Вт. Диаметр лазерного пучка на выходе из резонатора $6 \cdot 10^{-3}$ м.

Триботехнические испытания проводились с помощью микротрибометра MTU-2K7 [11] по схеме сфера-плоскость при возвратно-поступательном движении сферы-контртела относительно плоскости исследуемого образца. Износ поверхности трения определялся прямым измерением ширины дорожки трения H .

При проведении триботехнических испытаний оценивался коэффициент трения f и износостойкость образца по ширине дорожки трения H . Ширину дорожки трения H определяли прямым измерением на растровом электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan, Чехия) при увеличениях от 100 до 5000. Элементный анализ проводился методом EDX (энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии) на этом же микроскопе с использованием приставки INCA X-act (Oxford Instruments, Англия).

Определение микротвердости проводили на микротвёрдомере ПМТ-3М (ЛОМО, Россия) по методу Виккерса. Измеренные результаты были конвертированы в шкалу Роквелла с использованием корреляции по стандарту ASTM E-140.

Энергия лазера в импульсе определялась с помощью измерителя энергии ИКТ1-Н.

Результаты исследований и их обсуждение. В таблице 1 представлена оценка влияния параметров технологических режимов лазерной обработки (тока накачки I , длительности импульса τ) на значения

энергии в импульсе E , передаваемой на обрабатываемую поверхность. Изменение силы тока в диапазоне 60—120 А и времени импульса от 5 до 25 мс позволило получать изменение энергии в импульсе в пределах от 0,3 Дж до 4,1 Дж. Согласно полученным результатам одну и ту же энергию можно передать поверхности с помощью различных комбинаций значений I/τ . Так, например, энергетический импульс в 0,8 Дж поверхность может получить при её обработке либо током 60 А в течении 15 мс, либо током 120 А в течении 5 мс. Изучение морфологии поверхностей методом микроскопии показало, что обработанные одинаковой энергией, но различными режимами воздействия поверхности имеют существенные различия. Эти же различия прослеживаются и при триботехнических испытаниях (Рисунок 1 а, б)

Табл.1 Зависимость энергии в импульсе E (Дж) от времени импульса τ (мс) и тока накачки I (А)

Ток накачки I , А	Энергия в импульсе E (Дж) в зависимости от времени импульса τ (мс)				
	5	10	15	20	25
60	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2
120	0,8	1,4	2,0	3,5	4,1

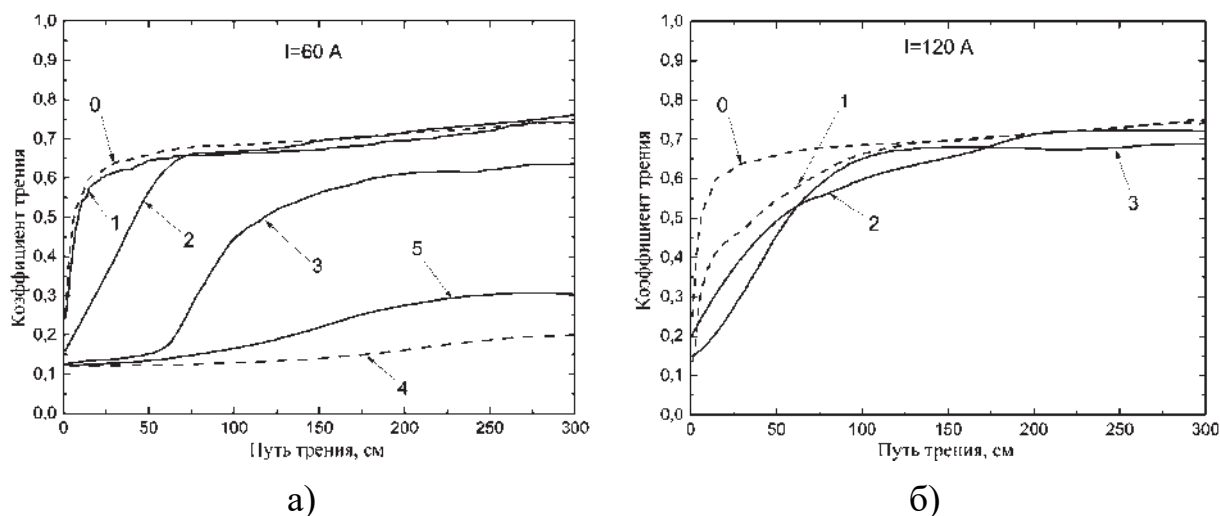


Рис. 1 — Зависимости влияния режимов обработки на коэффициент трения: на рисунке «а»-0 — исходная поверхность; 1 — после обработки энергией 0,3 Дж, 60 А/5 мс; 2 — 0,5 Дж, 60 А/10 мс; 3 — 0,8 Дж, 60 А/15 мс; 4 — 1,0 Дж, 60 А/20 мс; 5 — 1,2 Дж, 60 А/25 мс; на рисунке «б»-0 — исходная поверхность; 1 — 0,8 Дж, 120 А/5 мс; 2 — 1,4 Дж, 120 А/10 мс; 3 — 2,0 Дж, 120 А/15 мс

Табл.2 Триботехнические характеристики образцов до и после лазерной обработки

N	Параметры лазерной обработки			Триботехнические характеристики			HRC	H, мкм
				Зона приработки		Зона установившегося трения		
	I, А	τ , мс	E, Дж	f_{50}	V_k			
0	0	0	0	0,6	11,4	0,75	35	511
1	60	5	0,3	0,6	8,1	0,75	45	493
2	60	10	0,5	0,46	1,7	0,73	57	487
3	60	15	0,8	0,14	0,1	0,64	66	458
4	60	20	1,0	0,12	0,05	0,20	75	390
5	60	25	1,2	0,12	0,08	0,30	67	451
6	120	5	0,8	0,5	11,4	0,75	53	472
7	120	10	1,4	0,46	2,5	0,72	63	462
8	120	15	2,0	0,42	2,1	0,70	72	410

Согласно результатам триботехнических испытаний на графиках зависимостей коэффициента трения от пути трения испытания (Рис. 1) можно выделить две зоны влияния режимов лазерной обработки на коэффициент трения:

- зона приработки, характеризуемая коэффициентом трения до 50 см пути трения $-f_{50}$, и скоростью роста коэффициента трения Vf (скоростью приработки), оцениваемого по значению тангенса угла наклона прямолинейного начального участка кривой трения;

- зона установившегося трения, характеризуемая значением коэффициента трения f после 50 см пути трения.

Анализ рассматриваемых характеристик зоны приработки показал: с увеличением длительности импульса лазерной обработки уменьшается и коэффициент трения при приработке f_{50} и скорость роста коэффициента трения Vf (скорость приработки). Интересно отметить при повышении длительности лазерного импульса появление низких значений коэффициента трения уже в зоне приработки.

Эта же тенденция влияния длительности импульса на триботехническое поведение поверхности сохраняется и в зоне установившегося трения: с увеличением τ значения коэффициента трения f сначала уменьшается, но только до определенных значений длительности импульса. Для тока накачки 60 А – это 20 мс. Увеличение длительности импульса более 20 мс приводит к обратному росту коэффициента трения f . Объяснение такому влиянию времени обработки было получено при анализе морфологии поверхности образцов после различных режимов обработки и будет приведено ниже. Таким образом, влияние длительности импульса на триботехнические характеристики носит экстремальный характер. При токе накачки 60 А минимальный коэффициент трения 0,2 был получен при длительности импульса 20 мс.

Увеличение тока накачки до 120 А не привело к значительному улучшению триботехнических параметров. Хотя тенденция уменьшения f с

ростом τ сохраняется и для тока накачки 120 А, но эффект влияния значительно меньше по сравнению с током 60 А.

С этими данными согласуются и результаты исследований микротвердости поверхности и ее износостойкости (Таблица 2), оцененной по ширине дорожки трения Н. Согласно данным, представленным в [12] при не приводящих к оплавлению поверхности энергиях в импульсе повышение микротвердости поверхности в зоне нагрева может быть связано с увеличением плотности дефектов кристаллического строения.

Заключение. В результате проведенных исследований удалось с помощью лазерной обработки снизить коэффициент трения поверхности в 3,5 раза и получить износостойкую ярко выраженную кристаллитную структурой и отсутствие поверхностных дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ведерникова И.И., Полетаев В.А. Применение лазерного модифицирования для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. — 2019, (15), 18—25
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисю-ров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие / под ред. А.Г. Григорьянца. — Москва: МГТУ им. Баумана. — 2006
3. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маклаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. — Минск: Беларус. навука. — 2008
4. Белый А.В., Калиниченко А.С., Кукареко В.А., Девойно О.Г. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. — Минск: Белорусская наука. — 2017
5. Zhang H., Shi Y., Xu C.Y., and Kutsuna M. Sur-face Hardening of Gears by Laser Beam Processing // *Surface Engineering*. — 2003 (19), no. 2, April, 134—136
6. Mordike B.L. Improvement of Wear Properties by Laser Surface Treatment // *Proc. 3rd European Conf. «Laser Treatment of Materials. ECLAT'90» 2 Vol. Eds. H.W. Bergmann, R. Kupfer*. — 1990 (1), 371—376
7. Сафонов А.Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением // *МиТОМ*. — 1999, № 1, 7—10.
8. Петроченко С.В., Хао Ц., Юй С., Чжао К. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков (обзор)//*Омский научный вестник*. — 2024 (1), 56—62
9. Афанасьева Л.Е., Барабанова И.А., Ботянове В., Раткевич Г.В., Гречишкин Р.М. Структурные фазовые превращения в быстрорежущей стали при лазерной закалке с оплавлением поверхности многоканальным

СО² ЛАЗЕРОМ // Упрочняющие технологии и покрытия – 2013 – (104), №8, 10–13.

10. Мышковец В.Н., Максименко А.В., Шалупаев С.В., Юркевич С.Н. Лазерная установка с оптоволоконной приставкой и процессы сварки изделий из нержавеющей стали // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2003 (8), № 4, 84—87

11. Григорьев А.Я., Гуцев Д.М., Зозуля А.П., Ковалева И.Н., Кудрицкий В.Г., Мышкин Н.К., Семенюк М.С. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 // Трение и износ. — 2014 (35), № 6, 664—669

12. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. — Киев: Техника. — 1990