

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

В.П. Бирюков, И.М. Петрова, И.В. Гадолина

Статья посвящена исследованиям сопротивления усталости образцов стали 35 с лазерной наплавкой порошком на никелевой основе в сравнении с основным материалом в нормализованном состоянии. Приведены результаты металлографических исследований наплавленных слоев и характеристики усталости материалов образцов. Показано, что разработанная технология лазерной наплавки может быть использована для восстановления изношенных поверхностей роторов газоперекачивающих станций, шеек коленчатых валов и других высокоскоростных узлов трения.

Ключевые слова: лазерная наплавка, порошки на никелевой основе, усталостная прочность.

Введение

Возрастающие требования к надежности современных сложных технических систем вызывают необходимость создания новых материалов, сочетающих высокую износостойкость и прочность при различных условиях эксплуатации, в том числе при динамических нагрузках, и новых технологий, обеспечивающих соответствующие эксплуатационные характеристики. Одной из перспективных технологий является нанесение на конструкционные материалы покрытий наплавкой с помощью лазера. В зависимости от эксплуатационных требований можно наносить на поверхность покрытия, в состав которых входят износостойкие, коррозионностойкие и другие компоненты. В современном машиностроительном производстве важнейшей задачей является повышение ресурса работы деталей и узлов трения выпускаемой и введенной ранее в эксплуатацию техники. Такие детали, как валы электрических машин, роторы газоперекачивающих станций, коленчатые валы выводят из эксплуатации по причине износа посадочных поверхностей. В настоящее время парк эксплуатируемого оборудования и машин имеет остаточный ресурс по изнашиванию подобных узлов трения в пределах 20–40%. Технологии восстановления рабочих поверхностей позволяют продлить работоспособность машин. К таким технологиям относится восстановление рабочих размеров деталей порошковой наплавкой [1–4]. Кроме

того, большое значение имеют начальные характеристики поверхностей трения, которые могут быть улучшены применением лазерной наплавки порошковых материалов на посадочные поверхности новых изделий.

Целью данной работы является оценка влияния лазерной порошковой наплавки на характеристики сопротивления усталости материала образцов и сопоставление их с аналогичными характеристиками для образцов стали в нормализованном состоянии.

Технология подготовки и оборудование для наплавки образцов

Для проведения испытаний на усталость в соответствии с требованиями стандарта [5] образцы изготавливали из нормализованной стали 35 по размерам, указанным на рис. 1. Часть образцов подвергали последующей меха-

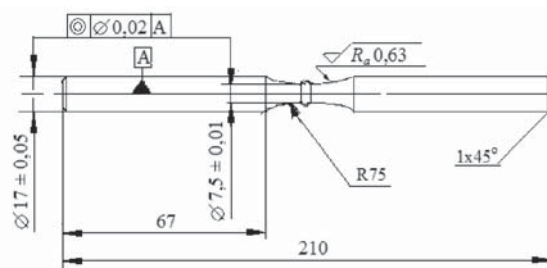


Рис. 1. Образец с наплавкой
для испытаний на усталость

нической обработке и полированию.

Для выполнения лазерной наплавки порошка на основе никеля 1550 («Höganäs», Швеция) были выбраны следующие технологические параметры установки (HUFFMANHC-205, США), оснащенной волоконным лазером ЛС-3,5 мощностью 3500 Вт, изготовленным в ООО НТО «ИРЭ-Полюс» [4]: массовый поток порошка – 1,5–6 г/мин; давление аргона 0,2 МПа; поток аргона – 3 л/мин; фракционный состав порошка 40–160 мкм. Наплавку на образцы производили при мощности излучения 500–1000 Вт, скорости перемещения 5–25 мм/с. На образцах (см. рис. 1) наплавляли два валика по винтовой линии с 50% перекрытием. Ширина наплавленного слоя составляла 1,2–1,3 мм при высоте наплавки 0,8–0,9 мм. Образцы протачивались по торцам наплавленного слоя при установке в центрах и по наружной поверхности с сохранением толщины наплавки 0,3–0,4 мм на сторону. Затем производилась обработка поверхности наждачной бумагой различной зернистости с последующей полировкой.

Методы исследований

Микроструктура наплавленных покрытий исследовалась с помощью оптического металлографического микроскопа Neophot-30 (Carl Zeiss JENA, Германия) с увеличением до 500 крат.

Для выявления микроструктуры наплавленных покрытий образцы были подвержены химическому травлению, для чего использовался раствор 5 мл $\text{HF} + 5$ мл $\text{HNO}_3 + 25$ мл $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Время травления составляло ~2 сек. С целью изучения тонкой структуры микрошлифов наплавленных покрытий образцы исследовались в растровом электронном микроскопе марки EVO 50 (Carl Zeiss, Германия).

Гарантированное разрешение прибора составляет 3 нм при использовании катода из гексаборида лантана (LaB_6). Ускоряющее напряжение – до 30 кВ, вакуум в колонне не меньше 10^{-7} Па. Изображение получали во вторичных и отраженных электронах с помощью детекторов:

- вторичных электронов Everhardt-Thornley;
- четырехквadrантного детектора отраженных электронов 4Q-BSD.

Определение элементного состава наплавки образцов проводилось методами рентгеновского микроанализа в аналитическом растровом электронном микроскопе EVO-50 при ускоряю-

щем напряжении 10–20 кВ (ток зонда 5–50 нА) с помощью:

- энергодисперсионного спектрометра INCAx-ACT (Oxford Instruments, Великобритания) с разрешением 133 эВ;
- волнового спектрометра INCAWave-500 (Oxford Instruments, Великобритания) с разрешением 5 эВ и чувствительностью 0,01 мас. %.

Глубина анализируемого слоя составляла ~1 мкм.

Микротвердость наплавки образцов измерялась по методу Виккерса на приборе HVS-1000 (Китай) с автоматическим нагружением индентором при величине нагрузки $P = 1$ Н. Время выдержки под нагрузкой было выбрано $\tau = 20$ сек.

Машина для испытаний на усталость обеспечивала нагружение образцов по схеме чистого изгиба при вращении и при симметричном цикле нагружения. Частота нагружения составляла 50 Гц. Регистрация числа циклов осуществлялась с помощью счетчика и одновременной фиксацией времени испытаний. При разрушении образца происходила автоматическая остановка машины. Основным критерием разрушения являлось полное разрушение образца.

При малом количестве образцов и отсутствии предварительных экспериментальных данных для выбора первого значения напряжения использовали справочную информацию о характеристиках прочности исследуемого материала. Оценка предела выносливости σ_{-1} при изгибе с вращением гладкого лабораторного образца диаметром $d_0 = 7,5$ мм проводилась по соотношению $\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001\sigma_b)\sigma_b$, где σ_b – предел прочности исследуемого материала (величины напряжений в МПа).

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 представлены микрошлифы зон лазерной наплавки на образец. На микрофотографии наплавленных слоев (рис. 2, а) наблюдается хорошее сплавление дорожек и зона термического влияния, составляющая 300–900 мкм в зависимости от режима обработки. При большем увеличении (рис. 2, б) в наплавленном слое проявляется дендритная структура, характерная для всех видов лазерной наплавки.

Исследовали элементный состав в наплавленном слое и зоне термического влияния в

спектрах 1–4 (см. рис. 2, а) с целью определения процентного содержания наплавляемых элементов в двух дорожках, примеси железа в наплавленном слое и содержания легирующих элементов в зоне термического влияния. Результаты исследования представлены в таблице.

Установлено, что большее содержание примеси железа во втором наплавленном слое связано с повышением температуры поверхностных слоев образца. Об этом свидетельствует большая глубина зоны термического влияния второй дорожки. Для уменьшения содержания материала основы в наплавленном слое необходимо повышение скорости обработки при прочих равных условиях. Из представленных в таблице результатов можно заключить следующее: составы двух наплавов (спектры 1 и 2) идентичны; составы материала переходной области и зоны термического влияния также идентичны и существенно отличаются от состава самих наплавов; состав зоны термического влияния отличается от состава исходного материала образца пониженным содержанием хрома и никеля.

Измерения микротвердости наплавленного

слоя по ширине дорожек наплавки показывают, что ее значения изменяются незначительно в пределах 4900–5500 МПа, что свидетельствует о стабильности технологического процесса наплавки. Микротвердость по глубине наплавленного слоя составляет 4800–5600 МПа до глубины 1300 мкм, затем наблюдается ее резкое уменьшение до 2600–3000 МПа в переходной зоне.

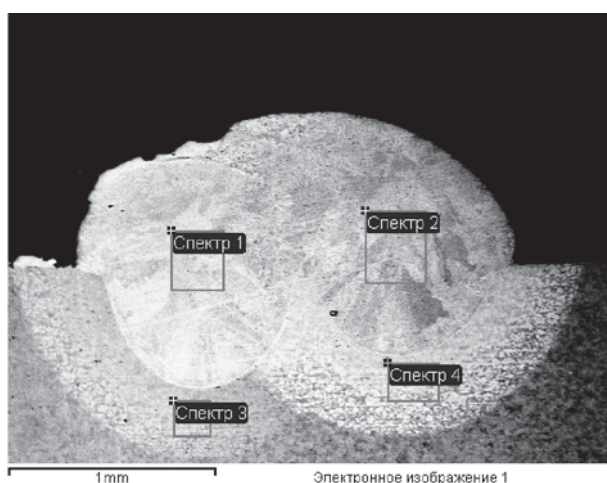
Кривые усталости по результатам испытаний образцов строили методом наименьших квадратов и путем графического интерполирования экспериментальных результатов. Определение параметров кривых усталости и их построение проводили с учетом образцов, не разрушившихся до принятой базы испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов.

Результаты усталостных испытаний представлены на рис. 3.

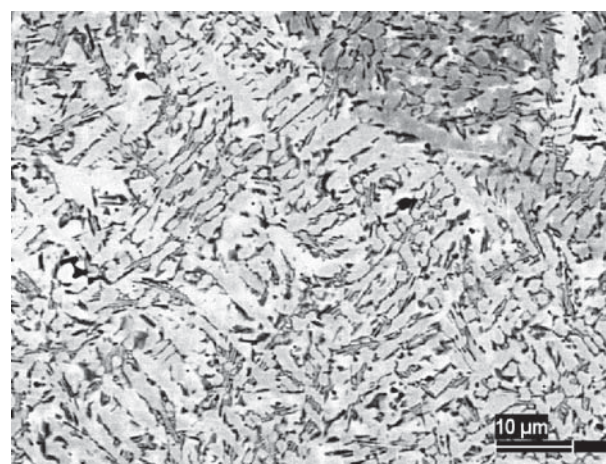
Проведенные испытания показывают снижение характеристик сопротивления усталости материала образца после лазерной наплавки, (кривая 3) по сравнению с характеристиками исходного материала (кривая 1) вследствие возникновения неблагоприятных растягиваю-

Химический состав наплавки, мас. %.

Элемент	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
Спектр 1	2,21	8,90	0,46	50,47	37,95
Спектр 2	2,63	11,31	0,47	37,97	47,63
Спектр 3	0,39	0,12	0,70	98,26	0,20
Спектр 4	0,44	0,10	0,64	98,68	0,13



а



б

Рис. 2. Микрошлифы зон наплавки порошка 1550 на никелевой основе:

а – общий вид зоны наплавки; б – дендритная структура зоны при большем увеличении

щих напряжений в поверхностном слое. Этот эффект упоминался и в монографии [6], где также было отмечено, что оптимизация технологии наплавки (регулирование зоны термического влияния, использование наплавки различных материалов и их смесей и др.) может позволить приблизить характеристики сопротивления усталости наплавленных образцов к характеристикам исходного материала. Применение последующей механической обработки образцов также улучшает характеристики сопротивления усталости.

В то же время для образцов с наплавленным покрытием наблюдается значительное повышение характеристик износостойкости [7]. Поэтому, если основным критерием работоспособности деталей в эксплуатации является износостойкость, то при сохранении или незначительном уменьшении характеристик сопротивления усталости эксплуатационные характеристики деталей после лазерной наплавки возрастают.

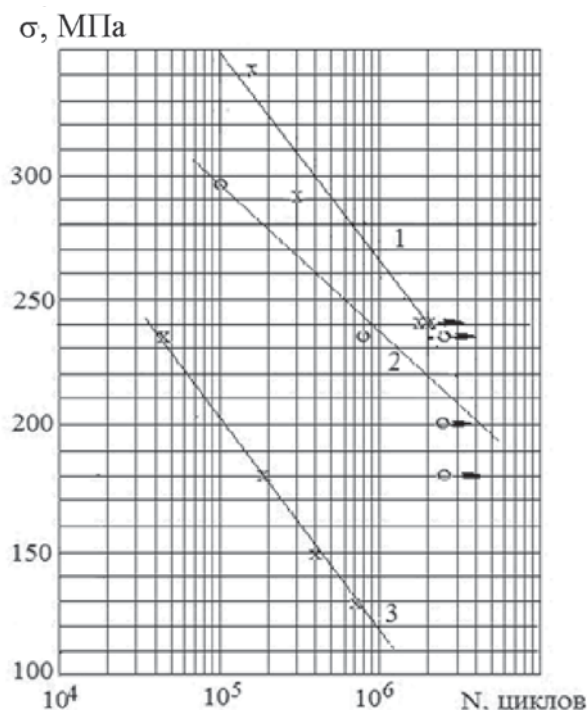


Рис. 3. Кривые усталости образцов после лазерной наплавки:

- 1 — для исходных нормализованных образцов;
- 2 — для образцов после лазерной наплавки с последующей проточкой и полировкой;
- 3 — для образцов после лазерной наплавки

Проведенные эксперименты показывают зависимость характеристик сопротивления усталости образцов, полученных при лазерной наплавке, от технологии и параметров наплавки. Ясно, что необходимы дальнейшие исследования, связанные с оптимизацией технологии лазерной наплавки порошковых материалов с целью уменьшения количества примеси материала основы в зонах наплавки и термического влияния. Так, минимальное тепловое воздействие на материал основы и деформация обрабатываемых деталей при лазерной наплавке выгодно отличают ее от дуговой наплавки.

В то же время, наблюдаемое повышение характеристик износостойкости после лазерной наплавки позволяет рекомендовать ее для восстановления поверхностей трения опор скольжения применительно к валам электрических машин, роторам газоперекачивающих агрегатов, коленчатым валам и другим деталям, выходящим из строя по причине износа посадочных поверхностей.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 664 с.
2. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. Анализ влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на формирование валков // Технология машиностроения. 2011. № 11. С. 19–21.
3. Бирюков В.П., Михайлин Б.Н., Фишков А.А. Технологии упрочнения, легирования и наплавки с использованием лазерного нагрева // Тяжелое машиностроение. 2010. № 1. С. 12–14.
4. Бирюков В.П., Смирнов С.Н., Петровский В.Н. и др. Лазерная наплавка поверхностей трения порошковыми материалами на основе никеля // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта, теория и практика: Материалы МНПК. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. Ч. 1. С. 21–25.
5. ГОСТ 25.502-79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость». — М.: Изд-во стандартов, 2012.
6. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными

потоками энергии / под ред. А.П. Гусенкова. – М: Наука. 1992. – 404 с.

7. Бирюков В.П., Гадолина И.В., Петрова И.М. и др. Определение механических и трибологических характеристик образцов с лазер-

ной наплавкой // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: Материалы МНПК. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. Ч. 1. С. 20–26.

Материал поступил в редакцию 04.05.2013

БИРЮКОВ
Владимир Павлович

E-mail: laser-52@yandex.ru
Тел.: (499) 135-35-19

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ИМАШ РАН. Доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения. Сфера научных интересов – лазерная модификация поверхности и методы определения ресурса работы узлов трения по критерию износа. Автор более 110 научных статей, шести изобретений.

ПЕТРОВА
Ирина Михайловна

E-mail: impetr@mail.ru
Тел.: (499) 135-30-74

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИМАШ РАН. Сфера научных интересов – прочность конструкций, усталость материалов, накопление повреждений в материалах с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных факторов, оценка долговечности. Автор 105 научных работ.

ГАДОЛИНА
Ирина Викторовна

E-mail: gadolina@mail.ru
Тел.: (499) 135-30-74

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИМАШ РАН. Сфера научных интересов – прочность конструкций, усталость материалов, накопление повреждений в материалах с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных факторов, оценка долговечности. Автор 52 научных работ.