

поверхностного нагрева позволила получить оптимальную глубину упрочняемого слоя. В сочетании с вязкой сердцевиной он создает распределение прочностных свойств стали по сечению, которые соответствуют распределению напряжений, возникающих при воздействии на изделие предельных нагрузок. Было показано, что предел выносливости третьей партии образцов, а следовательно и ее долговечность, выше предела выносливости первой партии образцов, обработанных по традиционной технологии. Таким образом, получение в рессорах высокопрочного состояния позволяет существенно повысить их долговечность или уменьшить их металлоемкость при сохранении долговечности, требуемой по техническим условиям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шепеляковский К.З., Исмаилов Р.Р., Литвин А.Н., Вишневецкий Н.И., Табака В.И., Русин В.А. Новая технология термической обработки рессорных листов грузовых автомобилей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 1992. — №2, — С. 11–14.
2. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. М.: *Металлургия*, 1982. — 400 с.
3. Огневский В.А., Островский Г.А., Рыскинд А.М., Шкляров И.Н. Упрочнение листовых рессор с применением индукционного нагрева // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 1984. — №7. — С. 22–27.
4. Белоус М.В., Черешен В.Т., Васильев М.А. Превращение при отпуске стали. — М.: *Металлург*, 1973. — С. 149–156.
5. Бодяко М.Н., Тарарук А.И., Гордиенко А.И., Семенюк Г.А. Способ термической обработки изделий. — Авторское свидетельство СССР № 1276673, С21D1/78; Заявл. 17.07.85.; Оpubл. 15.08.86.

УДК 621.793

О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова

### ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА В ПРОЦЕССАХ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Одной из наиболее широко применяемых разновидностей лазерной обработки является поверхностное легирование. С точки зрения получения вы-

сокотвердых и износостойких поверхностных слоев наиболее перспективны лазерное борирование и борохромирование [1]. Однако лазерная обработка обладает рядом недостатков: высоким градиентом свойств по глубине упрочненного слоя и уровнем остаточных напряжений [2]. Другим недостатком является значительное нарушение микрогеометрии поверхности, что предопределяет необходимость значительных затрат на финишную операцию и уменьшает толщину упрочненного слоя после окончательной механической обработки. Целью настоящего исследования явилось изучение влияния различных вариантов лазерного легирования на уровень микрогеометрии упрочненных зон.

Лазерной обработке подвергали образцы из стали 40Х, на плоскую поверхность которой наносили шликер двух составов:

- 1) Смесь аморфного бора и карбида бора;
- 2) Смесь аморфного бора и карбидов хрома ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  при объемном соотношении «бор/карбиды хрома», равном 1/1.

Для исследования использовали газовый  $\text{CO}_2$  — лазер типа ЛГН-702 мощностью 800 Вт, диаметр лазерного луча 1,2 мм. Рассматривали следующие варианты обработки:

- 1) Однократное лазерное легирование при скорости 200 мм/мин;
- 2) Двукратное легирование: последовательно со скоростями 200 и 400 мм/мин.
- 3) Двукратное легирование: последовательно со скоростями 200 и 900 мм/мин.

Одна серия образцов обрабатывалась вторично без смещения лазерных дорожек, вторая же — со смещением на величину 0,5 диаметра луча —  $d_n$ . Результаты расчета величины высотных параметров микрогеометрии по полученным профилограммам приведены в табл. 1. При расчете  $R_z$  длина опорной поверхности равнялась всей ширине зоны, переплавленной лазерным лучом на определенном режиме.

Независимо от изменения режимов обработки во всех случаях общая картина микрогеометрии поверхности после легирования представляет собой наложение малых с высотой порядка 5–10 мкм и таким же шагом на большие пики с высотой порядка 40–80 мкм и шагом соответствующим величине подачи лазерного луча. Образование больших пиков объясняется процессами, происходящими вследствие расплава и кристаллизации металла. Ввиду интенсивно происходящих процессов теплообмена в системе «лазерный луч — расплавленный металл — подложка» температура в различных точках ванны расплава неодинакова, что обуславливает активное перемешивание объемов металла, имеющих разную температуру. Направление тече-

ния металла в ванне расплава постоянно (рис. 1) и определяется так называемым «термокапиллярным эффектом» [3], обусловленным возникновением градиента коэффициента поверхностного натяжения по поверхности расплава.

Далее происходит его быстрое застывание ввиду высокой скорости охлаждения, сопровождающееся увеличением объема материала при мартенситном превращении. В результате формируется развитый рельеф поверхности. Такой «вал» металла наблюдается вдоль всей длины лазерной дорожки.

Малые пики имеют средний шаг неровностей профиля в несколько раз меньший по сравнению с исходным состоянием поверхности после механической обработки. Такой волнообразный микрорельеф поверхности формируется в результате скоростной кристаллизации расплава, причем количество малых пиков, по-видимому, соответствует количеству центров кристаллизации.

Повторные проходы лучом лазера приводят к увеличению высотных параметров микрогеометрии поверхности как для борирования, так и для борохромирования, тогда как в случае однократного борирования и борохромирования при скорости луча  $V=200$  мм/мин они приблизительно одинаковы.

Указанный эффект можно объяснить следующим. С увеличением количества проходов лазерной обработки изменяется проплавливающая способность луча. После однократного легирования формируется слой с неравновесной структурой, содержанием бора, близким к эвтектическому составу и, как следствие, меньшей температурой плавления. При повторном легировании с большей скоростью относительного перемещения луча энергия излучения расходуется на преодоление термического сопротивления обмазки и расплав слоя, полученного при первом проходе. Объем ванны расплава уменьшается, степень ее перегрева увеличивается и интенсифицируются процессы перемешивания и растекания расплавленного металла в стороны от центра луча, тогда как основной металл разогревается меньше. Возникает большой градиент температур, вследствие чего процесс застывания ванны расплава интенсифицируется, и затвердевание металла происходит при большей высоте пиков микрорельефа поверхности. Таким механизмом формирования микрогеометрии объясняется близость значений  $R_{\max}$  и  $R_z$  (в среднем  $R_{\max}/R_z \approx 1,2$ ).

В случае лазерного борирования с увеличением скорости повторных проходов высота больших пиков увеличивается. При лазерном борохромировании неровности микрогеометрии поверхности меньше, чем при борировании, причем с увеличением скорости второго прохода это различие более заметно. Это можно объяснить интенсификацией как процессов перемешивания так и затвердевания ванны расплава, а также меньшим термическим сопротивлением легирующей обмазки и переплавленного слоя в случае борохромирования. Соответственно, градиент температур и скорость затверде-

вания при борировании выше и высота неровностей микрогеометрии поверхности больше.

Таблица 1

**Высотные параметры микрорельефа поверхности при различных вариантах лазерной обработки**

Характер Лазерной Обработки	Скорость луча, мм/мин	Обработка без смещения лазерных дорожек		Обработка со смещением лазерных дорожек $\Delta=0,5 d_p$	
		$R_{\text{max}}$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_{\text{max}}$ , мкм	$R_z$ , мкм
1	2	3	4	5	6
Закалка	$V_1=200$	52	42	-	-
Однократное Легирование: Бор+карбид бора	$V_1=200$	59	48	-	-
Двукратное Легирование: Бор+карбид бора	$V_1=200$ $V_2=400$	77	63	52	41
Двукратное Легирование: Бор+карбид бора	$V_1=200$ $V_2=900$	88	76	61	53
Однократное Легирование: Бор+ карбид хрома	$V_1=200$	58	46	-	-
Двукратное Легирование: Бор+карбид хрома	$V_1=200$ $V_2=400$	68	58	49	40
Двукратное Легирование: Бор+карбид хрома	$V_1=200$ $V_2=900$	81	65	56	43

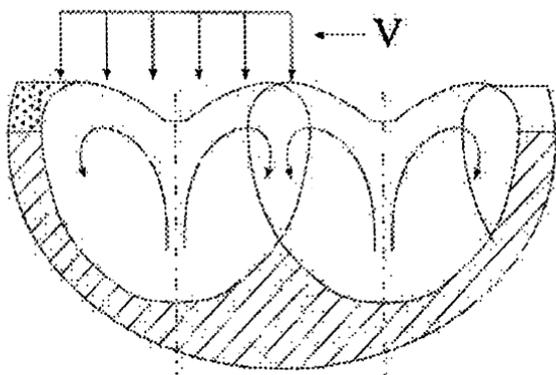
Примечание:  $V_1$  и  $V_2$  соответственно скорости первого и второго проходов.

При лазерном борировании малые пики неровностей имеют большую высоту и меньший средний шаг неровностей профиля по сравнению с борохромированием. Наблюдаются отдельные небольшие участки с аномально высокими неровностями микрогеометрии ( $R_z = 150...200$  мкм, шаг неровностей профиля  $S = 80$  мкм при опорной поверхности пика порядка 40 мкм).

Наличие участков аномальной микрогеометрии при борировании можно объяснить происходящим местами неполным проплавлением и неравномерностью слоя нанесенной легирующей обмазки на режимах с повышенной скоростью перемещения лазерного луча. Визуально на поверхности борированных дорожек можно наблюдать участки, на которых отсутствует металлический блеск. При царапании их острым индентором происходит отделение мелких частиц, что свидетельствует об отсутствии прочной адгезионной связи. В данном случае имеет место припекание частиц обмазки. На поверхности образца, переплавленной при большей скорости второго прохода,

таких участков наблюдается больше, однако общая их площадь не превышает 5 % зоны обработки.

Применение схемы двукратной лазерной обработки со смещением оси лазерной дорожки при повторном проходе на половину диаметра луча приводит к уменьшению высотных показателей микрогеометрии более чем на 30 % (табл. 1). Это можно объяснить следующим механизмом формирования микрорельефа. В данном случае в центре пучка излучения находится выступ металла, сформированный на предыдущем проходе и соответствующий краю лазерной дорожки. При переплаве металл под действием сил поверхностного натяжения растекается в стороны, однако ввиду высокой скорости кристаллизации расплава выступ в центре лазерной дорожки не успевает исчезнуть полностью. В результате формируется поверхность с чередованием пиков разной высоты.



*Рис. 1. Механизм формирования микрогеометрии при лазерной обработке с переплавом поверхностного слоя*

После лазерного легирования упрочненная поверхность подвергается механической обработке с целью исправления геометрических погрешностей и обеспечения заданных микрогеометрических параметров. Микрогеометрия поверхности, полученная после лазерного легирования, является одним из критериев оценки эффективности и практической применимости данной технологии, так как она определяет величину припуска на окончательную механическую обработку, которая равна максимальной высоте неровностей профиля переплавленного слоя. При этом необходимо, чтобы остающийся после механической обработки высокотвердый легированный слой превышал предельно допустимую величину износа рабочей поверхности

детали. Таким образом, при обработке технологического процесса лазерного легирования необходимо произвести сравнение параметров микрогеометрии и глубины переплавленного слоя с учетом распределения величин микротвердости.

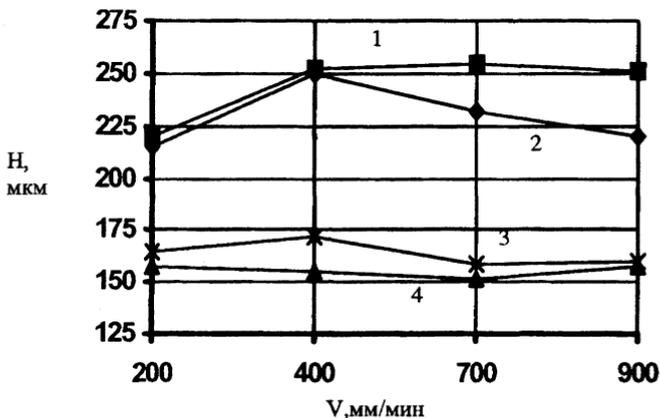


Рис. 2. Зависимость глубины легированного слоя от скорости перемещения луча лазера: 1 — борирование ( $\Delta = 0$ ); 2 — борирование ( $\Delta = 0,5$ ); 3 — борохромирование ( $\Delta = 0$ ); 4 — борохромирование ( $\Delta = 0,5$ )

Графики зависимости глубины легирования от скорости перемещения луча лазера при повторном проходе для различных вариантов обработки приведены на рис 2. Глубина легирования принималась равной глубине переплава, значения которой, в свою очередь, определялись металлографически и сверялись с данными дюротметрических исследований.

Если схема финишной операции механической обработки обеспечивает отсутствие погрешностей установки, величину припуска допустимо принимать на 2...4 мкм больше величины  $R_{\max}$ . Зависимость припуска на окончательную обработку от технологического варианта лазерного легирования представлена на рис 3. Максимальные величины припуска соответствуют режимам со скоростью перемещения луча лазера при повторном проходе  $V_2=900$  мм/мин и составляют при борохромировании 85 мкм, а при борировании 90 мкм. Для режимов со скоростью перемещения луча  $V_2=400$  мм/мин соответственно 72 мкм и 80 мкм. При использовании схемы легирования со смещением лазерных дорожек величина припуска снижается примерно на 40 % и находится в пределах 50...65 мкм.

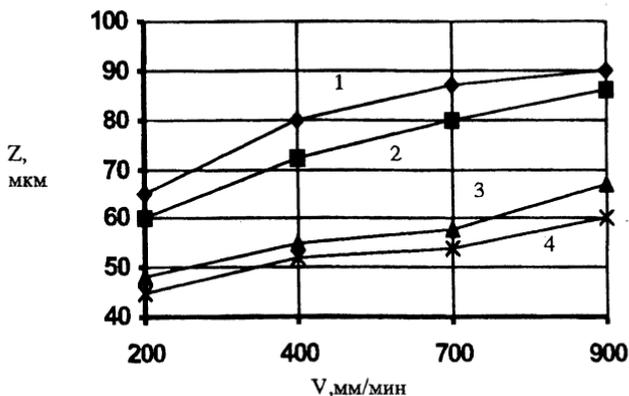


Рис. 3. Зависимость величины припуска на механическую обработку упрочненного слоя от скорости перемещения луча лазера на втором проходе:

- 1 — борирование ( $\Delta = 0$ ); 2 — борирование ( $\Delta = 0,5$ );  
 3 — борохромирование ( $\Delta = 0$ ); 4 — борохромирование ( $\Delta = 0,5$ )

Толщина легированного слоя после финишной операции имеет наибольшую величину при случае лазерном борировании, так как данный метод обеспечивает большую исходную глубину легирования, и при обработке со смещением лазерных дорожек, так как в этом случае значительно снижается величина припуска на обработку. В случае лазерного борохромирования при обработке без смещения дорожек легированный слой имеет толщину менее 100 мкм, что меньше допуска на износ для большого количества деталей, работающих в трибосопряжениях. В случае борохромирования со смещением дорожек соответствующая величина составляет от 100 до 130 мкм. Гарантированная толщина рабочего слоя после механической обработки упрочненной поверхности для разных вариантов лазерного борирования составляет от 130 до 180 мкм.

### Выводы:

1. Установлено, что характер формирования микрорельефа определяется механизмом оплавления боридных покрытий. Уровень нарушений микрогеометрии зависит от перемещения луча лазера при последнем проходе и находится в пределах:  $R_z$  от 40 до 80 мкм. Смещение оси лазерных дорожек при повторных проходах на половину диаметра пятна излучения обеспечивает снижение величины высотных параметров микрогеометрии примерно на 30 %.

2. Сравнение требуемых припусков под механическую обработку с результатами измерений глубины слоя показывает, что величина остающегося после механической обработки упроченного слоя находится в пределах от 80 до 130 мкм при борохромировании и от 130 до 180 мкм при борировании, что превышает допустимую величину износа для большинства деталей, работающих в трибосопряжениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Девойно О.Г., Ситкевич М.В., Спиридонов Н.В. Поверхностное легирование бором и хромом при лазерном нагреве / Вести АН БССР. Серия физико-технических наук. — 1987. — №1. — С. 51–56. 2. Григорянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — С. 122–139.

УДК 621. 793

**С.А. Иващенко, А.М. Самаль, В.М. Голушко**

### **ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Качество и долговечность защитных покрытий зависят не только от свойств материала покрытия, но и от подготовки поверхности подложки. Подготовка поверхности — одна из основных операций технологического процесса нанесения покрытий. В некоторых отраслях промышленности она составляет до 10 % трудоемкости изготовления изделий [4, 7]. Интенсификация процесса подготовки поверхности является большим резервом повышения производительности труда и снижения себестоимости изделий. Поэтому усовершенствование процесса подготовки поверхности является весьма актуальной технической задачей.

Подготовка поверхности при получении покрытий, включает очистку поверхности, придание ей соответствующего профиля (микрорельефа) и определенных физико-химических характеристик, что обеспечивает необходимую адгезию покрытий и товарный вид изделия. Очистка поверхности — это удаление с поверхности вредных или нежелательных посторонних веществ.