

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ, КАРБОНИТРАЦИИ И ИХ СОЧЕТАНИЯ С ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ TiN НА НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ P6M5

В.М. Мацевитый, И.Б. Казак*, А.И. Спольник***

**Институт машин и систем, г. Харьков, Украина*

***Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства, г. Харьков, Украина*

Комплексним дослідженням виявлено істотний вплив лазерної обробки і карбонітрації на твердість, зносоустійкість та теплопровідність сталі P6M5, вивчено вплив цих обробок та їх комбінації з вакуумно-плазмовим покриттям TiN на адгезію різців зі сталі P6M5 з матеріалом, що оброблюється.

Комплексним исследованием установлено существенное влияние лазерной обработки и карбонитрации на твердость, износостойкость и теплопроводность стали P6M5, изучено влияние этих обработок и их сочетания с вакуумно-плазменным покрытием TiN на схватываемость резцов из стали P6M5 с обрабатываемым материалом.

Substantial influence of laser treatment and carbonitration on hardness, wear resistance and heat conductivity of P6M5 steel has been shown by complex investigation. The influence of these treatments and their combinations with vacuum-plasma TiN coating on the adhesion of P6M5 steel cutters with machining material has been studied.

Из известных способов поверхностного упрочнения [1-3] лишь немногие можно использовать для повышения работоспособности режущих инструментов из быстрорежущих сталей. Среди таких способов значительный интерес представляют еще редко применяющиеся и недостаточно изученные лазерная обработка [4,5] и карбонитрация [6,7].

При анализе влияния поверхностного упрочнения инструментов из быстрорежущих сталей на их работоспособность главное внимание обращают на изменения твердости, теплостойкости и износостойкости инструментального материала. Не отрицая важности этих свойств, подчеркнем, что основным фактором, влияющим на работоспособность режущих инструментов из быстрорежущих сталей, является температурный режим резания, определяющий характер контактных процессов на рабочих поверхностях инструментов и закономерности наростообразования на передней поверхности [2]. На температурный режим резания, кроме задаваемых параметров процесса (геометрии заточки инструмента, скорости V , подачи S , глубины резания t), существенно влияют теплофизические свойства инструментального материала и его схватываемость (адгезия) с обрабатываемым материалом. Поэтому очень важно знать, каким образом поверхностное упрочнение изменяет эти характеристики инструментального материала.

В литературе нет данных о влиянии карбонитрации и лазерной обработки на теплофизические свойства быстрорежущих сталей и схватываемость с конструкционными материалами при резании. Нет таких сведений и для случаев использования карбонитрации и лазерной обработки в комплексе с покрытиями типа TiN.

Целью настоящей работы было изучение этих вопросов применительно к стали P6M5.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Сталь P6M5, являющаяся типичной быстрорежущей сталью умеренной теплостойкости, выбрана в качестве объекта исследования как наиболее распространенная в металлообработке.

Заготовки образцов для исследований в виде кубиков с размером ребра 10 мм и заготовки для резцов в виде параллелепипедов с размерами 12x12x50 мм вырезали из прутков стали P6M5 в состоянии поставки. Заготовки подвергали обычной для этой стали термообработке: закалке от 1230 °C в масле и последующему трехкратному отпуску при 560 °C (длительность каждого отпуска 1 ч, охлаждение с печью). Твердость стали после термообработки составляла (64 – 65)HRC₃.

Далее заготовки со всех сторон шлифовались на глубину 1 мм. Готовые образцы для исследований имели форму кубика с размером ребра 10 мм. Резцы затачивали на универсальном заточном станке модели ЭП-642 эльборовым кругом. Геометрия заточки: $\gamma = 0^\circ$; $\phi = 45^\circ$; $\phi_1 = 15^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 12^\circ$; $\lambda = 0^\circ$, где γ - передний угол; ϕ - главный угол в плане; ϕ_1 - вспомогательный угол в плане; α - задний угол; α_1 - вспомогательный задний угол; λ - угол наклона главного лезвия. Такой выбор геометрии режущей части резца обусловлен стремлением упростить методику изучения контактных характеристик.

Изготовленные образцы были использованы для металлографических исследований влияния карбонитрации и лазерной обработки на структуру стали, для измерения твердости и изучения триботехнических характеристик. Резцы были разделены на 6 основных групп (табл. 1).

Таблица 1

Обозначение видов обработки резцов

Номер группы	Вид обработки
1	Термообработка
2	Термообработка + карбонитрация
3	Термообработка + лазерная обработка передней поверхности
4	Термообработка + нанесение покрытия TiN
5	Термообработка + карбонитрация + покрытие TiN
6	Термообработка + лазерная обработка + покрытие TiN

Перед карбонитрацией и лазерной обработкой поверхности образцов и резцов тщательно обезжиривали.

Карбонитрацию осуществляли в печи Ц-75 при 570°C (± 10 °C) в течение 20 мин. Для получения рабочей атмосферы использовали гранулированный карбамид (величина гранул 1...5 мкм). Поскольку на поверхности стали при карбонитрации образуется рыхлый слой окалины толщиной ~ 100 мкм, все образцы и резцы после обработки зачищали наждачной шкуркой. Микротвёрдость после этого была равной (11500...13000) МПа.

Лазерную обработку осуществляли на импульсной лазерной установке "Квант-16". Задав диаметр пучка 4,5 мм и длительностью импульса $5 \cdot 10^{-3}$ с, в широких пределах варьировали наиболее важный параметр обработки - энергию импульса (10...30 Дж). Изучение зависимости микроструктуры, образующейся в результате лазерного воздействия на поверхность, от плотности энергии в пучке позволило выбрать оптимальный режим обработки, приводящий к формированию специфической структуры. Полученная структура отличалась слабой травимостью в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте, более высоким по сравнению с исходным состоянием стали (после термообработки) твердостью и износостойкостью.

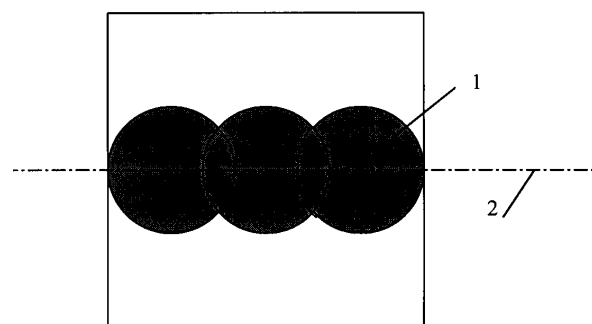


Рис. 1. Схема расположения участков импульсного воздействия на образце для триботехнических испытаний (1 – «пятно» лазерного импульса; 2 – центральная ось площадки контакта контртел при триботехнических испытаниях)

Оптимальный режим обработки (плотность энергии 1,8 Дж/мм²) был использован для упрочнения образцов для триботехнических испытаний (схема расположения участков импульсного воздействия представлена на рис.1), а также для упрочнения передней поверхности резцов. В последнем случае был использован единичный импульс, при этом граница лазерного "пятна" отстояла от главной и вспомогательной режущих кромок на расстояние $\sim 0,1$ мм.

Вакуумно-плазменные покрытия TiN толщиной ~ 6 мкм были нанесены на переднюю поверхность резцов в установке "Булат-3Т" по режимам, рекомендуемым при промышленном использовании метода КИБ.

Исследование микроструктуры стали Р6М5 после карбонитрации и лазерной обработки осуществляли на металлографическом микроскопе МИМ-7, микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г.

Испытания триботехнических характеристик осуществляли на машине трения СМЦ-2 по схеме "плоскость-цилиндр", при этом неподвижным телом служили кубические образцы стали Р6М5 с различной обработкой, а подвижным телом - цилиндрические шлифованные образцы диаметром 50 мм, изготовленные из нормализованной стали 45. В качестве смазки использовали 3% эмульсию на основе эмульсола ЭГТ. Смазывание осуществляли погружением части подвижного тела в эмульсию. Испытания на износостойкость проводили при нагрузке 1000 Н (при заданной геометрии образца этой нагрузке соответствует напряжение $\sigma \approx 200$ МПа) и скорости скольжения 1,3 м/с. Длительность испытаний 1 ч.

Износ цилиндрических образцов определяли взвешиванием на весах АДВ-200, износ контртела подсчитывали по замерам ширины "дорожки" трения, образующейся на образцах-кубиках в процессе испытаний.

Коэффициент трения измеряли в зависимости от нагрузки при ступенчатом нагружении в диапазоне нагрузок 0,2...2,0 кН.

Контактное взаимодействие резцов с обрабатываемым материалом изучали на токарно-винторезном станке модели 1А62, оснащённом динамометром УДМ-600, при кратковременном (~ 30 с) точении нормализованной стали 45 (НВ 175 .. 185) по следующему режиму: $V = 94,5$ м/мин; $S=0,25$ мм/об, $t=0,5$ мм. В процессе резания измеряли составляю-

щие силы резания P_x , P_y , P_z , определяли коэффициент укорочения стружки K_L , длину контакта стружки с передней поверхностью инструмента l_n , калориметрически определяли мощность теплового потока в инструмент Q_p (соответствующие методики описаны в работе [2]).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.2 представлена зависимость микротвердости от глубины залегания исследуемых объемов под поверхностью карбонитрированного образца.

Можно выделить две области: приповерхностную толщиной 5...6 мкм, где микротвердость имеет одинаковый уровень (~ 13 000 МПа), и внутреннюю область толщиной ~15 мкм, где микротвердость монотонно уменьшается от 13000 МПа до уровня, характерного для стали после термообработки (~9000 МПа).

В табл. 2 приведены результаты измерений микротвердости карбонитрированного слоя (измерения на поверхности образцов) в зависимости от температуры последующего дополнительного отпуска (отпуск осуществляли в муфельной печи под слоем чугунной стружки; длительность отпуска при каждой температуре 1 ч). Здесь же для сравнения приве-

дены значения микротвердости после дополнительного отпуска в сердцевине образцов. Видно, что

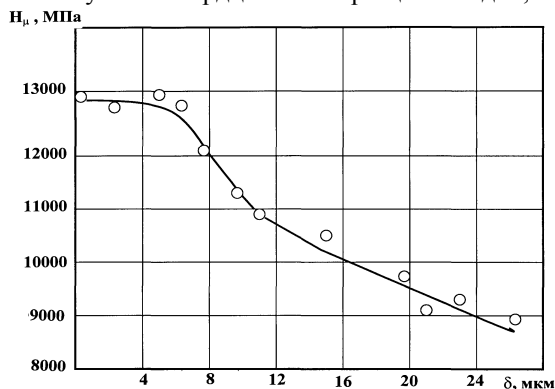


Рис. 2. Зависимость микротвёрдости карбонитрированного слоя от глубины залегания (δ) исследуемых объёмов под поверхностью образца

твёрдость карбонитрированного слоя во всем интервале исследуемых температур отпуска на 1400..2200 МПа выше твёрдости сердцевины. Таким образом, использованный режим карбонитрации обеспечивает заметное (~ на 50 °С) повышение теплоустойчивости стали.

Таблица 2

Влияние температуры дополнительного отпуска на микротвердость стали Р6М5

Место измерения микротвёрдости	Микротвердость перед отпуском, МПа	Микротвердость (МПа) после отпуска при температуре		
		570 °С	600 °С	700 °С
Сердцевина образца	9000	9200	9300	5000
Карбонитрированный слой	13000	11000	10700	7200

В таблице 3 приведены результаты триботехнических испытаний. Как видно, карбонитрация обеспечивает некоторое увеличение коэффициента трения при больших нагрузках и повышает нагрузку задиробразования. Кроме того, благодаря карбонитрации существенно (почти в три раза) возрастает из-

носостойкость стали Р6М5 и несколько увеличивается ее изнашивающая способность.

В целом результаты испытаний позволяют считать, что используемый режим карбонитрации обеспечивает эффективное и характерное для этого вида химико-термической обработки изменение свойств быстрорежущей стали.

Таблица 3

Влияние карбонитрации и лазерной обработки стали Р6М5 на характеристики трения и изнашивания при трении по стали 45

№ партии образцов	Величина коэффициента трения ($\times 10^2$) при нагрузках Р в кН										Износ колочки, $г \times 10^3$	Износ ролика, $г \times 10^3$
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0		
1	8,7	7,8	7,7	8,4	8,6	7,5	задир	-	-	-	14	17
2	8,7	7,8	7,7	9,1	9,8	9,6	9,4	9,6	задир	-	5	21
3	8,7	6,8	6,1	6,7	7,2	7,4	7,6	8,9	8,6	8,2	8	16

Металлографические исследования стали Р6М5 после лазерной обработки по оптимальному режиму показывают, что глубина упрочненного слоя, характеризующегося слабой травимостью в 3% растворе азотной кислоты в этиловом спирте и имеющего микротвердость ~ 10000 МПа, составляет ~ 40 мкм.

Из таблицы 3 следует, что в рассматриваемых условиях трения использованный режим лазерной обработки обеспечивает повышение нагрузки задиробразования и износостойкости стали.

Результаты изучения характеристик контактного взаимодействия резцов с обрабатываемым материалом представлены в табл. 4. Здесь $F = \sqrt{P_x + P_y}$ -

сила трения стружки о переднюю поверхность резца; P_x , P_y , P_z - составляющие силы резания (P_x - продольная составляющая; P_y - радиальная составляющая; P_z - нормальная составляющая); $Q_m = \alpha F (V/K_L)$ - мощность теплового источника на передней поверхности; где α - коэффициент пропорциональности; $q = Q_m/S_k$ - интенсивность теплового источника на передней поверхности, где S_k - площадь контакта на передней поверхности; Q_p - мощность теплового потока в инструмент.

Анализируя представленные в табл. 4 результаты, важно отметить следующее:

- карбонитрация и в большей степени лазерная обработка приводят к существенному возрастанию

составляющих сил резания, что связано, прежде всего, с увеличением адгезионного взаимодействия стружки с передней поверхностью резца в центральной (высокотемпературной) части контакта [2]. В результате увеличивается мощность теплового источника Q_m и мощность теплового потока в инструмент Q_p .

- карбонитрация обеспечивает увеличение отношения Q_p / Q_m , а лазерная обработка - снижение этого отношения, что является следствием существенно различного влияния рассматриваемых обработок на теплопроводность объемов резца, прилегающих к площадке контактного взаимодействия стружки и инструмента.

Таблица 4

Результаты изучения характеристик контакта резцов из стали Р6М5 (после упрочняющей обработки) с обрабатываемым материалом

Вид обработки →	1	2	3	4	5	6
F, Н	216	228	281	193	179	203
P_z , Н	326	353	365	305	306	319
K_L	2,60	2,70	2,65	2,31	2,43	2,30
l_n , мм	0,86	0,93	0,88	0,67	0,61	0,62
Q_m , Вт	140,9	143,2	179,9	130,8	116,6	138,8
Q_p , Вт	24,8	27,5	26,3	21,8	21,8	20,7
Q_p / Q_m , %	17,6	19,2	14,6	16,7	18,7	14,9
q , 10^6 Вт/м ²	231,7	217,8	289,0	276,8	275,0	322,7

В справедливости такого заключения можно убедиться при анализе задачи распределения возникающей при тчении теплоты. В нашем эксперименте используется острый (незатупленный) инструмент, что позволяет исключить из рассмотрения процессы, происходящие на задней поверхности резца. Упрощенную схему тепловых потоков в этом случае можно представить следующим образом. В зоне условной плоскости сдвига действует деформационный источник теплоты мощностью Q_d . Часть этой мощности поступает в заготовку, а вторая часть переходит в стружку, обеспечивая одинаковое повышение температуры стружки в любой точке ее поперечного сечения. В надрезцовой части стружки (условно говоря, непосредственно на передней поверхности инструмента) действует тепловой источник $Q_{тп}$ от работы силы трения F . Часть теплоты этого источника переходит в стружку, повышая температуру прирезцовых ее объемов, а вторая часть (Q_p) - поступает в резец. Таким образом, параметр $b = Q_p / Q_{тп}$ - это по существу доля теплоты источника $Q_{тп}$, поступающая в резец.

Анализ решения балансовых задач распределения теплоты между контактирующими и перемещающимися относительно друг друга телами, имею-

щими на площадке контакта источник теплоты, показывает, что b в общем случае является функцией теплофизических свойств контактирующих материалов и ряда других параметров (размера площадки контакта, скорости резания, коэффициента укорочения стружки), а характер функциональной зависимости определяется типом теплового источника [8].

В нашем эксперименте для практически одинаковых условий резания резцами, обработанными по типу 1, 2 и 3, наблюдаемые изменения b могут быть лишь следствием влияния лазерной обработки и карбонитрации на теплопроводность объемов материала резца, прилегающих к его передней поверхности. При этом увеличение b свидетельствует об увеличении теплопроводности этих объемов, а уменьшение b - об уменьшении теплопроводности.

Поэтому полученные результаты говорят о том, что карбонитрация приводит к повышению теплопроводности стали Р6М5, а лазерная обработка - к уменьшению ее теплопроводности. Причина такого влияния указанных обработок на теплопроводность может заключаться в изменении концентрации легирующих элементов (в частности, хрома) в α -твердом растворе стали в результате карбонитрации. Она уменьшается в связи с частичным уходом леги-

рующих элементов из твердого раствора в образующиеся нитриды, а в случае лазерной обработки - наоборот, концентрация легирующих элементов в твердом растворе увеличивается в связи с частичным растворением карбидной фазы при лазерном нагреве.

В отличие от карбонитрации и лазерной обработки покрытие TiN снижает схватываемость передней поверхности со стружкой, в результате существенно снижаются силы резания, уменьшается K_L , уменьшается длина контакта стружки с передней поверхностью, снижается мощность источника $Q_{тп}$ и мощность теплового потока в инструмент Q_p . Некоторое уменьшение отношения $Q_p / Q_{тп}$ может быть связано как с низкой теплопроводностью покрытия TiN, так и с уменьшением протяженности теплового источника (l_n).

Весьма интересен результат, полученный на резцах партий 5 и 6. По сравнению с резцами 4 резцы 6 характеризуются большими значениями F , а значит более сильным схватыванием со стружкой. Резцы 5 - наоборот, обладают более слабым схватыванием. При этом как и в случаях без покрытия отношение $Q_p / Q_{тп}$ имеет самое низкое значение на резцах с лазерной обработкой (резцы группы 6) и самое высокое - на резцах с карбонитрацией (образцы группы 5). Эти результаты, с одной стороны, подтверждают вывод об увеличении теплопроводности стали Р6М5 при карбонитрации и об уменьшении ее при лазерной обработке. С другой - эти результаты свидетельствуют о существовании температурной зависимости схватываемости покрытия TiN с обрабатываемым материалом: чем ниже температура на передней поверхности, тем меньше схватываемость.

ВЫВОДЫ

1. Карбонитрация повышает износостойкость и теплостойкость стали, а также увеличивает ее теплопроводность.

2. Лазерная обработка по оптимальному режиму повышает износостойкость и уменьшает теплопроводность стали Р6М5.

3. Карбонитрация и лазерная обработка, а также их сочетание с вакуумно-плазменным покрытием TiN существенно изменяют схватываемость передней поверхности резцов из стали Р6М5 с обрабатываемым материалом, что можно использовать в практике для целенаправленной коррекции этого важного свойства инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2-х томах. Т. 1* / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: «Машиностроение», 1978.
2. В.М. Мацевитый *Покрывтия для режущих инструментов*. Харьков: «Вища школа, изд-во ХГУ», 1987.
3. V.I. Lapshin, I.M. Neklyudov, V.I. Ter-joshin. *Influtnce of the plasma stream irradiation on the surface modification. Structure and properties of materials*. // ВАНТ. ННЦ ХФТИ, №6, 2001г.
4. К.И. Крылов, В.Т. Прокопенко, А.С. Митрофанов. *Применение лазеров в машиностроении и приборостроении*. Л.: «Машиностроение», 1978.
5. Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, А.И. Кокора. *Лазерная обработка материалов*. М.: «Машиностроение», 1975.
6. Д.А. Прокошкин: А.с. №576350 (СССР): *Способ химико-термической обработки инструмента*. Открытия. Изобрет., 1977, №38, с.58.
7. Д.А. Прокошкин. *Химико-термическая обработка металлов - карбонитрация*. М.: «Металлургия», 1984.
8. А.Н. Резников. *Теплофизика процессов механической обработки материалов*. М.: «Машиностроение», 1981.