

## УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Развитие промышленности требует создания деталей с поверхностными слоями, обладающими комплексом заданных свойств. Варьировать комплексом физико-механических и эксплуатационных характеристик деталей машин и инструмента, работающих в особо тяжелых условиях, в значительной степени помогает использование ступенчатых методов обработки, позволяющих получать слоистые износостойкие поверхности.

К наиболее распространенным методам поверхностной обработки применительно к инструментальным материалам можно отнести лазерную и электроискровую обработки.

Использование энергии лазерного луча для проведения поверхностной термической обработки представляет значительный интерес с учетом специфических его особенностей:

- возможность концентрации в локальной зоне поверхности высоких плотностей мощности, практически недостижимых другими методами, что, в свою очередь, обеспечивает: 1) получение сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения тонкого поверхностного слоя и формирование за счет этого слоев сверхбыстрой закалки с повышенным комплексом свойств; 2) эффект локальности обработки, т. е. возможности упрочнения только рабочих поверхностей деталей без значительного их объемного разогрева;

- возможность точного управляемого энергетического воздействия на заданную точку поверхности при широком диапазоне его варьирования, что дает предпосылки для управления структурой и свойствами упрочняемой поверхности в процессе обработки;

- легкость управления лазерным лучом в смысле возможности автоматизации процессов;

- экологическая чистота процессов обработки.

Однако эффект лазерного упрочнения определяется маркой материала, из которого изготовлена заготовка.

Электроискровая обработка обеспечивает создание износостойких покрытий с высоким уровнем физико-механических свойств на рабочих поверхностях деталей.

Комбинация указанных методов позволит объединить их достоинства, избежав недостатков каждого из них. Лазерная обработка электроискровых покрытий позволит направленно модифицировать их свойства. В то же время известно, что предварительная подготовка поверхности в значительной степени влияет на результат электроискровой обработки.

Перспективным направлением при создании упрочняющего слоя на поверхностях является лазерная обработка с последующим электроискровым легированием поверхности твердым сплавом, что обеспечивает получение целого комплекса свойств в приповерхностном слое. На эксплуатационные характеристики деталей, работающих на износ в условиях ударного нагружения, влияют: микротвердость, глубина упрочненного слоя, сплошность наносимого покрытия, остаточные напряжения в поверхностных слоях и возможность их релаксации, демпфирующие свойства, микрорельеф поверхности, методы формирования структуры и свойств упрочненного слоя; геометрия слоя (возможность получения дискретного подслоя), стабильность сформированной структуры и свойств. Отмечено, что лазерная обработка приведет к насыщению структуры металла двойниками и дислокациями, уменьшению балла зерна, измельчению карбидов. Кроме того, в результате воздействия лазерного излучения на поверхности образуются параллельно расположенные упрочненные дорожки, которые ложатся с определенным коэффициентом перекрытия.

Последующая обработка поверхности методом электроискрового легирования твердосплавным электродом с расположением упрочняющих дорожек перпендикулярно направлению следов лазерной обработки способствует получению слоистых высокоизносостойких слоев с перекрытием неупрочненных зон. Сплошность покрытия при этом составляет 90-100 % и регулируется. Сочетание же электроискрового легирования и электромагнитной обработки значительно снижает шероховатость поверхности. Воздействие магнитного поля может изменять важные физико-механические свойства поверхностей. Повышение качества и эффективности обработки достигается

ется путем комбинирования импульсов электрического и магнитного поля в различных сочетаниях [1].

Целью работы является изучение влияния предварительной лазерной обработки и последующего электроискрового легирования в магнитном поле на комплекс физико-механических свойств.

#### Методика исследований

Для исследований были использованы образцы стали X12M в закаленном состоянии [2]. После низкого отпуска при температуре 160°C была получена мартенситная структура. Твердость поверхностного слоя 62...63 HRC, сердцевины 40...45 HRC. Для изучения механизма превращений, происходящих при лазерной обработке, поверхность подвергали излучению непрерывного лазера Комета-2 с последовательным увеличением энерговклада. Изучали распределение микротвердости по сечению образца, микроструктуру и фазовый состав.

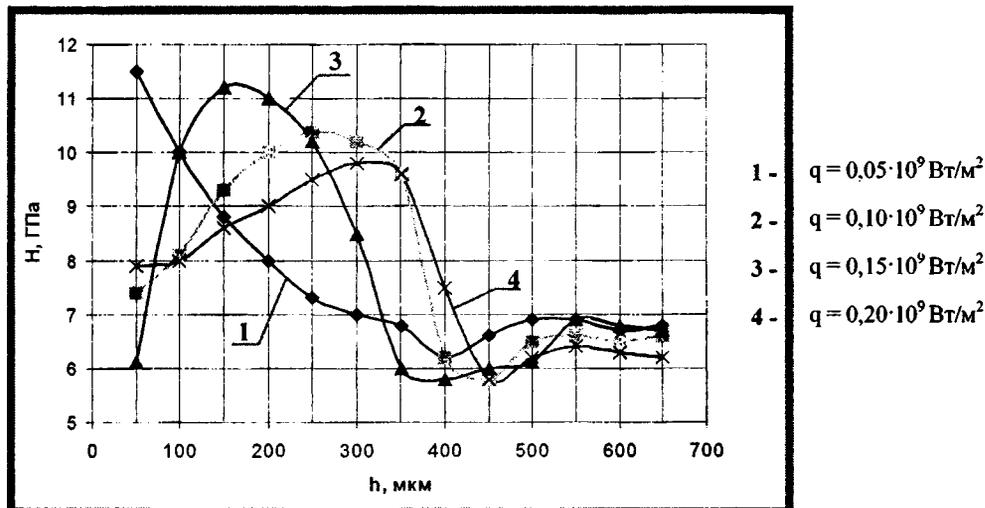


Рисунок 1 – Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя после лазерной обработки

Электроискровое легирование осуществляли на установке ЭФИ – 46А. Установка работает на шести режимах, оснащена генератором импульсов и электродержателем, внутри которого находится электромагнитный вибратор. К якору вибратора с помощью универсального зажима крепится анод из упрочняющего материала. Для исследований был выбран твердый сплав ВК – 8 .

Режимы обработки выбирались исходя из рекомендаций [3], где отмечено, что упрочнение инструментальных сталей наблюдается в интервале плотностей энергии  $0,5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3$  Дж/см<sup>2</sup>.

#### Обсуждение результатов.

В результате упрочнения образцов лазерным лучом были получены слои толщиной 120...500 мкм. Выявлены два типа структур, значительно отличающихся друг от друга. Структура поверхности, упрочненной при плотности мощности  $0,15 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, имеет слоистое строение. Слой, расположенный непосредственно у поверхности, представляет собой мартенсит, мелкодисперсные карбиды и значительное количество остаточного аустенита, что подтверждается твердостью слоя. Второй слой состоит из мелкодисперсных карбидов и мартенсита, имеет максимальную твердость, причем с увеличением плотности мощности глубина верхнего слоя возрастает. Далее идет слой со структурой отпуска и более низкой твердостью (до 5,7 ГПа) (рисунок 1, кривая 3).

Интервал режимов плотности мощности  $q = 0,1 - 0,2 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V = 13$  мм/с представляет интерес тем, что он является граничным, при котором на поверхности начинается оплавление. При плотности мощности выше  $0,2 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup> происходит оплавление поверхности.

Второй тип структур наблюдается при режимах лазерной обработки  $q = 0,05 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V = 13$  мм/с (рисунок 1, кривая 1). Слой, расположенный непосредственно у поверхности, представляет собой мартенсит, мелкодисперсные карбиды и незначительное количество остаточного аустенита. Второй слой – зона с троститной структурой с понижением микротвердости до 6,0 ГПа.

Таким образом, при увеличении глубины зоны термического воздействия лазера в стали X12M непосредственно на поверхности образуется слой с наличием аустенита, что отрицательно сказывается на механических свойствах металла.

Для получения поверхностей с высокими триботехническими свойствами образцы, обработанные лазером, подвергали электроискровому легированию на различных режимах.

Суммарная глубина упрочненного слоя в зависимости от режимов находится в пределах 300-500 мкм (рисунок 2). Причем с увеличением энергии импульса с  $R = 4,5$  А/Дж до  $R = 86$  А/Дж глубина верхнего наносимого слоя возрастает.

Слой состоит из четырех зон. Первая зона – «белый слой», полученный после электроискрового легирования на основе твердого сплава ВК-8. Вторая зона – зона отпуска, незначительная по величине. Третья – зона термического воздействия лазерной обработки, оканчивающаяся четвертой зоной – зоной отпуска. Зоны вторая и четвертая предположительно могут способствовать улучшению демпфирующих свойств материала.

На рисунке 3 представлена зависимость изменения микротвердости для образцов, упрочненных лазером с электроискровым легированием.

Изменение микротвердости по глубине образцов подтверждает образование слоистой износостойкой зоны у поверхности глубиной 250...450 мкм с максимальной микротвердостью у поверхности до 16 ГПа и высокой микротвердостью по глубине слоя до 11...12 ГПа.

Известно, что электроискровое легирование может сопровождаться снижением степени упрочнения поверхности за счет термических эффектов, вызывающих релаксационные процессы и рост зерен в приповерхностных слоях. Высокие скорости термического нагружения, связанные с интенсивным теплоотводом при электроискровом легировании могут вызвать образование микротрещин за счет термоусталостных явлений. Значительную роль в формировании износостойкого покрытия играет материал подложки, который обеспечивает прочность сцепления покрытия с основой и его работоспособность в условиях нагружения.

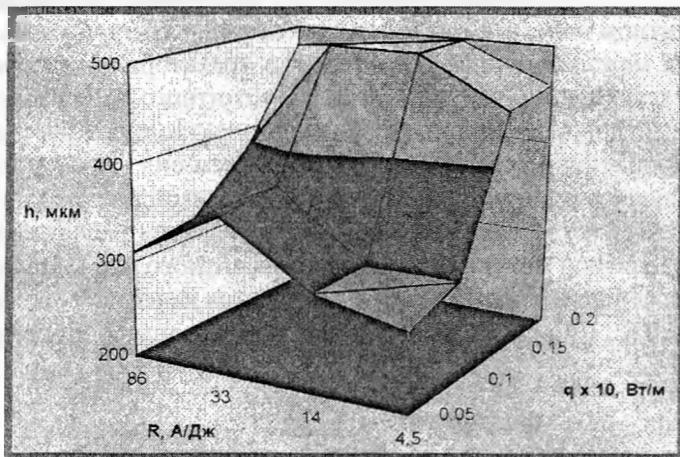


Рисунок 2 – Зависимость глубины упрочненного слоя от режимов ступенчатой обработки

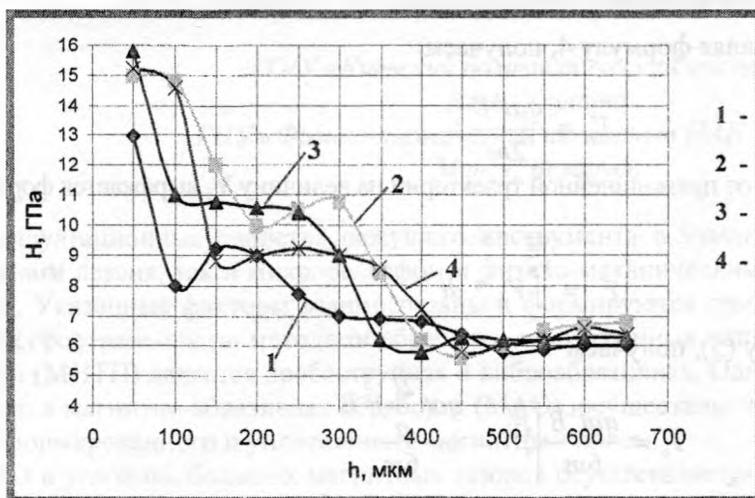


Рисунок 3 - Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя после лазерной обработки и электроискрового легирования

Использование лазерной обработки образцов перед электроискровым легированием обеспечивает снижение внутренних напряжений за счет наложения вторичного температурного поля. Образуется мелкодисперсная структура материала подложки, что исключает значительный рост зерна и, следовательно, появление микротрещин.

Одним из существенных недостатков процесса электроискрового легирования является сравнительно высокая шероховатость упрочненной поверхности при средних режимах обработки. Одним из путей снижения шероховатости может быть дополнительно воздействие магнитного поля [4].

Была поставлена задача – сместить и перераспределить по поверхности канал расплава, тем самым уменьшить шероховатость и улучшить качество наносимого слоя.

Электроны движутся под действием ускоряющего потенциала к аноду. При внешнем магнитном поле, равном нулю, траектория электрона прямолинейна. При наложении магнитного поля на межэлектродное пространство траектория электронов искривляется. При больших значениях магнитной индукции внешнего магнитного поля процесс ЭИЛ может ухудшаться. При сближении электродов на стадии пробоя межэлектродного расстояния электроны будут отклоняться от прямолинейной траектории под действием сил магнитного поля и не будут попадать на анод. В этом случае разряд между электродами произойдет только в момент их касания, что ухудшает качество наносимого слоя. Поэтому был произведен расчет величины максимально допустимого значения магнитной индукции внешнего магнитного поля, при которой можно воздействовать на канал разряда и на электрод с целью улучшения качества поверхности.

Сила, действующая на электроны со стороны магнитного поля, равна:

$$F = qVB, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд электрона;

$V$  – скорость движения электрона;

$B$  – величина магнитной индукции внешнего магнитного поля.

Зависимость между межэлектродным расстоянием ( $l$ ) и скоростью движения электродов выражается зависимостью:

$$l = \frac{at^2}{2} = \frac{V^2}{2a}, \quad (2)$$

где  $a$  – ускорение электронов.

Ускорение ( $a_n$ ) электронов под действием силы  $F$  можно выразить формулой:

$$a_n = \frac{qVB}{m}, \quad (3)$$

где  $m$  – масса электрона.

В момент времени  $t$  ускорение равно:

$$\dot{v}_n = \int_0^t \frac{qatB}{m}; \quad (4)$$

Учитывая, что в момент времени  $t$  скорость равна

$V_n = \int_0^t a * dt$ , подставляя формулу 4, получаем:

$$V_n = \frac{qat^2 B}{2m}; \quad (5)$$

Отклонение электрона от прямолинейной траектории на величину  $Y$ , выражается формулой:

$$Y_o = \int_0^{\sqrt{\frac{2l}{a}}} V_n * dt \quad (6)$$

Подставляем формулу (5), получаем

$$Y_o = \frac{qat^3 B}{6m} \Big|_0^{\sqrt{\frac{2l}{a}}} = \frac{qa \left(\frac{2l}{a}\right)^{\frac{3}{2}} B}{6m} \quad (7)$$

Из (7) следует (8):

$$B = \frac{Y_o 6m}{qa \left(\frac{2l}{a}\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (8)$$

Подставляя в формулу значения массы и заряда электрона, а также задавая значения  $Y_o$  равным диаметру электрона, получаем величину магнитной индукции внешнего магнитного поля, равную 0,18 Тл, при которой электроны не достигают анода. Следовательно, разряд будет происходить только при касании электродов. Из полученной зависимости следует, что за счет наложения внешнего магнитного поля в пределах 0,18 Тл можно воздействовать на канал разряда с целью перераспределения по поверхности, тем самым изменяя шероховатость.

Для подтверждения теоретических выводов и изучения характера воздействия внешнего магнитного поля было разработано устройство на базе серийной установки для электроискрового легирования ЭФИ-46А, позволяющее воздействовать вращающимся магнитным полем на процесс электроискрового легирования.

#### **Выводы.**

Предварительная лазерная обработка электроискровых покрытий позволяет получить мелкодисперсную структуру материала подложки, что исключает значительный рост зерна и, следовательно, появление микротрещин.

В результате последующего электроискрового легирования у поверхности образуется слоистая износостойкая зона глубиной 250...450 мкм с максимальной микротвердостью у поверхности до 16 ГПа и высокой микротвердостью по глубине слоя до 11...12 ГПа

Сочетание же электроискрового легирования и электромагнитной обработки значительно снижает шероховатость поверхности. Комбинирование перечисленных способов обеспечивает повышение качества и эффективности обработки.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ящерицын, П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1988. – 272 с.
2. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. Коваленко, В.С. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / В.С. Коваленко. – М.: Наука, 1986. – 276 с.
4. Девойно, О.Г. О поверхностном упрочнении стали 40×13 лазерным лучом / О.Г. Девойно, Г.М. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1983. – Вып. 8. – С. 127–128.

УДК 621.923.7

*Майборода В.С., Лебедев В.Я.*

### **КИНЕМАТИКА ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ МАГНИТНЫХ ЗАЗОРОВ**

*НТУУ «Киевский политехнический институт»*

*Киев, Украина*

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»*

*Минск, Беларусь*

Эксплуатационные свойства режущего инструмента в значительной мере определяются как материалом лезвия, так и микрорельефом и физико-механическими свойствами его поверхностного слоя. Указанные факторы взаимосвязаны и формируются при финишной обработке инструмента. Распространенными методами обработки многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин (МНТП) является дробеструйная и виброабразивная. Одним из новых финишных методов является магнитно-абразивная обработка (МАО), осуществляемая посредством абразивного порошка, сформированного и уплотненного магнитным полем.

МАО в условиях больших магнитных зазоров осуществляется при активном взаимодействии обрабатываемой поверхности с реологическим инструментом, формируемым магнитным полем и геометрией полюсных наконечников. Процесс характеризуется комбинированным воздействием на обрабатываемую поверхность, включающим ударное, фрикционное взаимодействие и микрорезание [1, 2].

Процесс МАО МНТП целесообразно выполнять на установках типа «кольцевая ванна», когда деталь совершает вращение вокруг собственной оси и перемещается через рабочую зону. При вращении пластины вокруг собственной оси со скоростью  $\omega_n$  теоретически может обрабатываться только часть грани многогранной пластины. Другая часть будет находиться в «тени». Поэтому необходимо детали задавать дополнительное движение - перемещение через рабочую зону со скоростью  $\omega_x$  для обеспечения более равномерной обработки граней пластины. В работах [1, 2]