

Кане М.М., Крайко С.Э., Александров Е.С.

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ****НА МИКРОТВЕРДОСТЬ РЕЕК ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ***Белорусский национальный технический университет**Минск, Беларусь*

*В статье показана перспективность применения лазерной термообработки для упрочнения сложнопровильного инструмента (червячных фрез, резцовых головок и др.) из быстрорежущих сталей. Рассмотрены условия такого упрочнения. Приведены некоторые результаты экспериментального исследования влияния этих условий на микротвердость реек сборных червячных фрез из стали Р6М5.*

Зубофрезерование червячными фрезами является в настоящее время основным методом формообразования зубьев цилиндрических шестерен и шлицевых валов. Основным недостатком этого процесса является его низкая производительность. Во многом это обусловлено сложными условиями процесса резания (зубья червячной фрезы снимают припуск вершинной и боковыми поверхностями одновременно) и использованием в связи с этим низких режимов резания (скорость резания  $v = 30...50$  м/мин, подача  $s_0 = 1...3$  мм/об) [1]. Известные марки твердых сплавов не пригодны для работы в условиях переменного резания, сопровождающегося ударами, что характерно для зубофрезерования. Поэтому для изготовления сложнорежущего зуборезного инструмента (к ним относятся также дисковые фрезы, протяжки и резцовые головки) применяют в основном быстрорежущие стали Р6М5 и Р9К10. Основным методом упрочнения сложнорежущего инструмента, используемым в настоящее время, является нанесение покрытий на основе TiN и TiC с помощью ионно-плазменной обработки. Это весьма трудоемкий и дорогой процесс. Как показывает опыт, малая толщина покрытия (обычно 5...20 мкм) не позволяет существенно увеличить стойкость режущего инструмента. К тому же, после затупления инструмента необходимо удалить старое покрытие, заточить инструмент и нанести новое покрытие. Это весьма усложняет и удорожает обработку таким инструментом.

На наш взгляд весьма перспективным методом упрочнения сложнорежущего зуборезного инструмента, применяемого для обработки зубьев с  $m = 2..6$  мм, является лазерная термообработка. Рабочей поверхностью таких инструментов, в основном подверженной износу, является передняя поверхность. Её небольшие габариты (высота зубьев таких инструментов обычно не более 10 мм) позволяют выполнять их поверхностную закалку за один проход лазерного луча. Лазерная закалка с помощью лазера непрерывного действия позволяет получить глубину закалки углеродистых сталей до 600 мкм без оплавления и деформации обрабатываемой поверхности [2]. Это позволяет значительно снизить трудоемкость и стоимость процесса упрочнения повысить его эффективность по сравнению с ионно-вакуумными покрытиями.

Для проверки возможностей лазерной закалки сложнорежущего инструмента из стали Р6М5 выполнены исследования влияния условий такой закалки на микротвердость реек сборной червячной фрезы для обработки шлицов  $m=4,5$  мм и  $z=12$  вала 1222- 1701182 коробки перемены передач трактора МТЗ-1222. Рейки рассматривались в стадии поставки на участок механической обработки шлицов: после закалки до 62...63 HRC и шлифовки.

Для исследований применяли лазерный технологический комплекс на базе газового CO<sub>2</sub> лазера непрерывного действия «Комета 2» с мощностью излучения до 1000 Вт и 3-х координатной системы для перемещения луча лазера относительно образцов. При лазерной закалке были приняты меры по выравниванию условий теплоотвода по всему рабочему профилю рейки и отсутствию оплавления режущей кромки зуба.

Пределы изменения режимов обработки фрезы приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Пределы изменения параметров лазерной термобработки**

| Наименование характеристик опыта | Натуральные значения факторов |   |  |
|----------------------------------|-------------------------------|---|--|
|                                  | Диаметр луча d, мм, (X1)      | Скорость перемещения луча v, мм/мин, (X2) | Мощность лазерного излучения N, Вт, (X3) |
| Основной уровень                 | 2,75                          | 2250                                      | 650                                      |
| Интервал варьирования            | 1,25                          | 1250                                      | 150                                      |
| Верхний уровень                  | 4,0                           | 3000                                      | 800                                      |
| Нижний уровень                   | 1,5                           | 1500                                      | 500                                      |

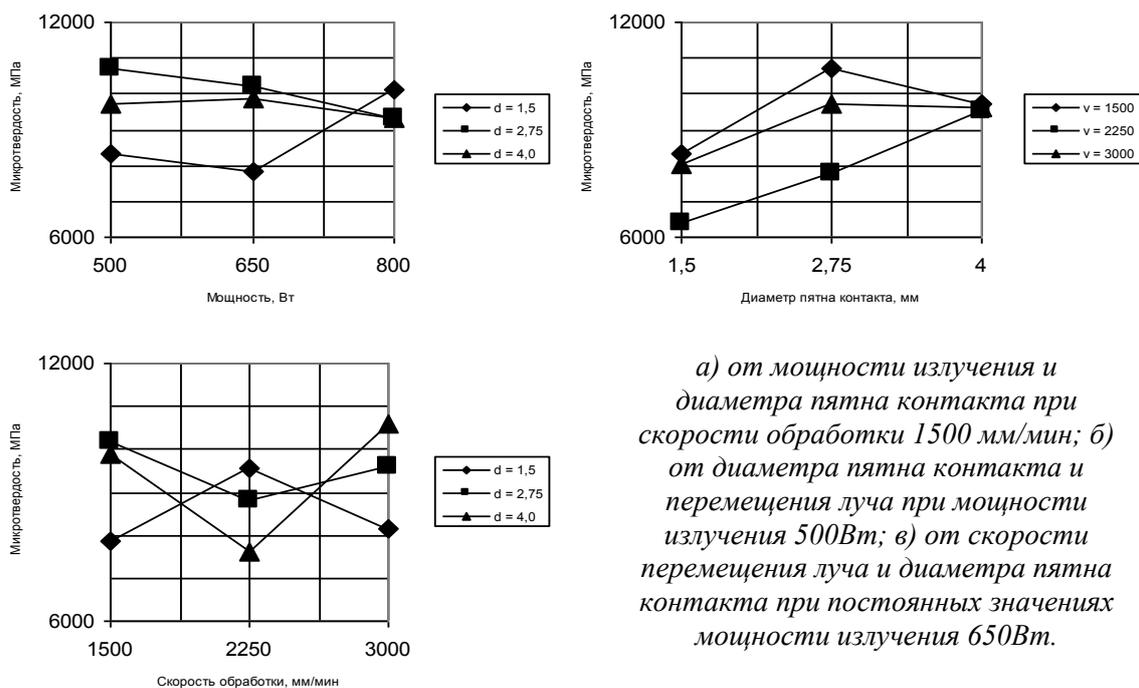
План эксперимента и его основные результаты приведены в таблице 2.

**Таблица 2 – Основные результаты эксперимента**

| №  | Факторы        |                |                | Результаты эксперимента (микротвёрдость Нц, МПа) |                  |                  |         |
|----|----------------|----------------|----------------|--|------------------|------------------|---------|
|    | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | Y <sub>ср</sub>                                  | Y <sub>max</sub> | Y <sub>min</sub> | оплав.* |
| 1  | +1             | +1             | +1             | 8360   | 11680            | 4880             | -       |
| 2  | -1             | +1             | +1             | 7470   | 9740             | 5360             | +       |
| 3  | +1             | -1             | +1             | 9300   | 12880            | 6130             | -       |
| 4  | -1             | -1             | +1             | 10100  | 11680            | 5720             | +       |
| 5  | +1             | +1             | -1             | 9640   | 11680            | 7620             | +       |
| 6  | -1             | +1             | -1             | 8040   | 11680            | 6340             | +       |
| 7  | +1             | -1             | -1             | 9700   | 10640            | 8940             | +       |
| 8  | -1             | -1             | -1             | 8340   | 11140            | 5190             | +       |
| 9  | 0              | +1             | +1             | 9120   | 13550            | 5540             | -       |
| 10 | 0              | +1             | -1             | 9710   | 11140            | 7620             | +       |
| 11 | 0              | -1             | +1             | 9330   | 14270            | 4590             | -       |
| 12 | 0              | -1             | -1             | 10700  | 12260            | 9330             | -       |
| 13 | +1             | 0              | +1             | 8600   | 11680            | 4220             | -       |
| 14 | +1             | 0              | -1             | 9540   | 11140            | 8580             | -       |
| 15 | -1             | 0              | +1             | 6610   | 7620             | 5720             | +       |
| 16 | -1             | 0              | -1             | 6440   | 9330             | 3220             | +       |
| 17 | +1             | +1             | 0              | 10590  | 13550            | 7340             | -       |
| 18 | +1             | -1             | 0              | 9870   | 12880            | 6810             | -       |
| 19 | -1             | +1             | 0              | 8150   | 11140            | 5540             | +       |
| 20 | -1             | -1             | 0              | 7850   | 11140            | 5540             | +       |
| 21 | +1             | 0              | 0              | 7600   | 10640            | 5720             | -       |
| 22 | -1             | 0              | 0              | 9570   | 15050            | 6570             | +       |
| 23 | 0              | 0              | +1             | 7110   | 10180            | 3140             | +       |
| 24 | 0              | 0              | -1             | 7800   | 13550            | 4330             | +       |
| 25 | 0              | +1             | 0              | 9600   | 12260            | 6810             | +       |
| 26 | 0              | -1             | 0              | 10200  | 11680            | 8580             | +       |
| 27 | 0              | 0              | 0              | 8810   | 10180            | 7620             | -       |

\*Примечание: «+» – наличие оплавления, «-» – отсутствие оплавления.

После лазерной термообработки рейки разрезались на отдельные зубья и изготавливались образцы для изучения микротвёрдости. Образцы шлифовались для получения поверхности, перпендикулярной передней режущей кромке. Измерения микротвёрдости производилось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100Н: в продольном направлении по передней поверхности с шагом 15 мкм (поверхностная микротвёрдость) и в поперечном – с тем же шагом для оценки распределения микротвёрдости по глубине.



а) от мощности излучения и диаметра пятна контакта при скорости обработки 1500 мм/мин; б) от диаметра пятна контакта и перемещения луча при мощности излучения 500Вт; в) от скорости перемещения луча и диаметра пятна контакта при постоянных значениях мощности излучения 650Вт.

Рис. 1 – Зависимости средней микротвёрдости закаленного слоя от условий лазерной закалки

На рис.1 приведены некоторые зависимости средней микротвердости закаленного слоя от мощности излучения, диаметра луча лазера и скорости перемещения лазерного луча вдоль упрочняемой поверхности.

Формы полученных зависимостей указывает на то, что они близки к линейным. Поэтому для их описания используется полином первой степени с учётом эффектов парных и тройного взаимодействий. Всего было рассмотрено 8 видов зависимостей. Для оценки их адекватности использовали F-критерий Фишера.

Уравнение адекватно результатам эксперимента, если соблюдается условие  $F_p < F_{кр}$ . Критическое значение критерия Фишера для принятого уровня значимости  $\alpha=0,05$  и чисел степеней свободы  $f_1=4$  и  $f_2=8$   $F_{кр} = 3,84$ .

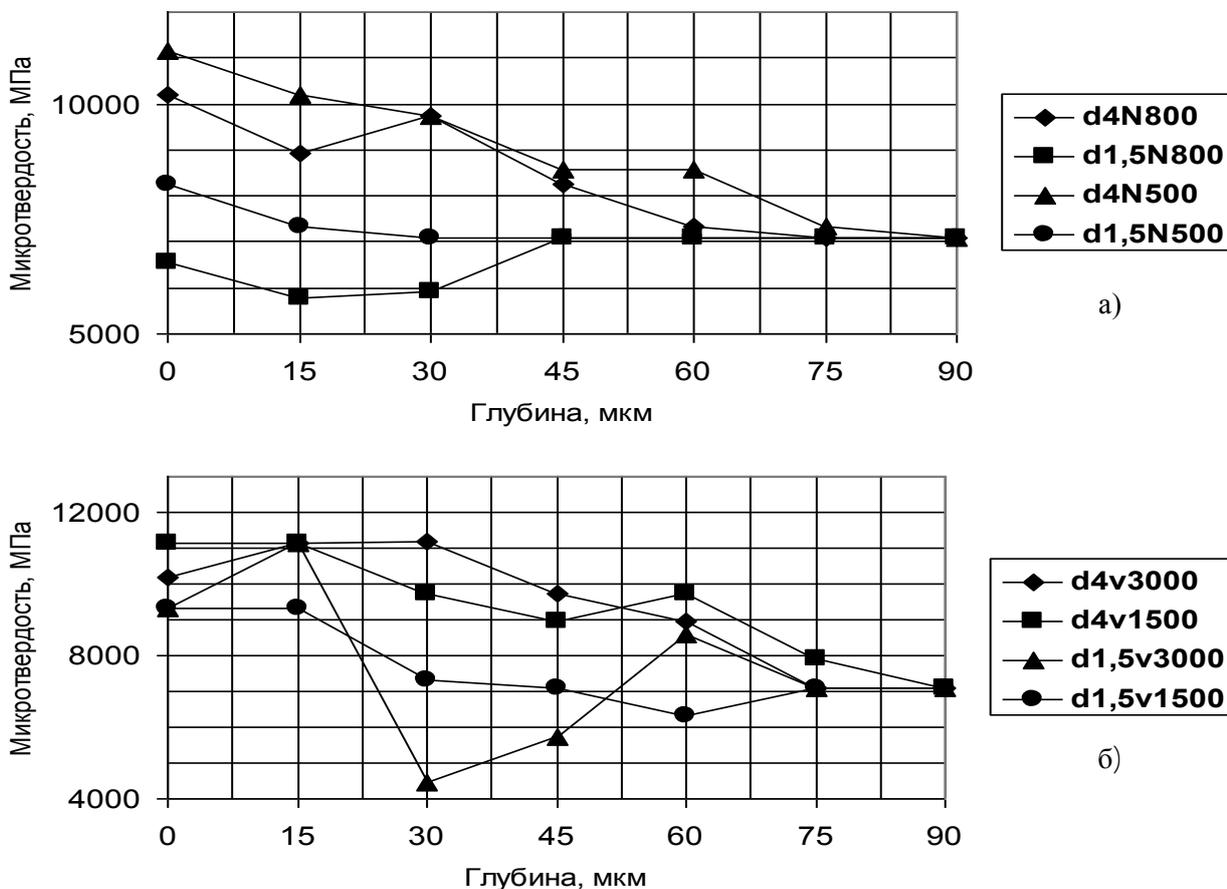
В таблице 3 приведены полученные зависимости в относительных единицах и значения F-критерия Фишера для каждой зависимости. С наилучшей точностью рассматриваемый процесс описывается первой зависимостью.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение микротвёрдости неоплавленной поверхности образцов из стали Р6М5 при лазерном упрочнении в рассмотренных условиях имеет место при увеличении диаметра луча, уменьшении мощности и скорости перемещения луча.

Таблица 3 – Оценка адекватности полученных моделей с помощью критерия Фишера

| № п/п | Вид уравнения $H_{\mu} = f(d,v,N)$ в относительных единицах                    | Критерий Фишера адекватности модели $F_p$ |
|-------|--|---|
| 1     | $Y1 = 9118 + 587X1 - 523X2 + 62,5X3 + 423X1X2 - 5,8X2X3 - 298X1X3 + 163X1X2X3$ | 0,000006                                  |
| 2     | $Y2 = 9118 + 587X1 - 523X2 + 62,5X3$   | 2,068                                     |
| 3     | $Y3 = 9118 + 587X1 - 523X2 + 62,5X3 + 423X1X2$                                 | 0,811                                     |
| 4     | $Y4 = 9118 + 587X1 - 523X2 + 62,5X3 - 5,8X2X3$                                 | 2,067                                     |
| 5     | $Y5 = 9118 + 587X1 - 523X2 + 62,5X3 - 298 X1X3$                                | 1,444                                     |
| 6     | $Y6 = 9118 + 587X1 - 523X2 + 62,5x3 + 423X1X2 - 5,8X2X3$                       | 0,811                                     |
| 7     | $Y7 = 9118 + 587X1 - 523X2 + 62,5x3 + 423X1X2 - 298X1X3$                       | 0,187                                     |
| 8     | $Y8 = 9118 + 587X1 - 523X2 + 62,5X3 - 5,8X2X3 - 298X1X3$                       | 1,443                                     |

Нами было изучено изменение микротвёрдости закаленного слоя по его глубине после лазерного упрочнения на различных режимах (рис.2) для неоплавленных образцов. Установлено, что максимальные значения микротвёрдости распространяются на глубину 30...60мкм, а общая глубина упрочнения достигает 100мкм.



*а - от мощности излучения и диаметра пятна контакта при скорости обработки 2250 мм/мин, б - от скорости обработки и диаметра пятна контакта при мощности излучения 650Вт.*

Рис. 2 – Изменение средней микротвёрдости закаленного слоя по его глубине

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Оптимальными режимами обработки для достижения максимальной твердости в пределах 11140...12260 МПа при условии отсутствия оплавления является сочетание максимального пятна контакта ( $d=4\text{мм}$ ) при минимальных показателях скорости обработки ( $v=1500\text{мм/мин}$ ) и мощности излучения ( $N=500\text{Вт}$ ). Глубина зоны термического влияния при указанных режимах достигает 90...100мкм.

2. Применение лазерного термического упрочнения при оптимальных режимах обработки позволило увеличить поверхностную твердость рабочей части зубчатой рейки по сравнению с исходной в 1,3...1,5 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колёс и передач. Под общ. ред. В.Е. Старжинского и М.М. Кане – СПб.: Профессия. 2007. – 832с.
2. Астапчик С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. – Минск: Белорус. Наука, 2008. – 251с.