

УДК 621.789

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 9ХС  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ИТТЕРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА**

**<sup>1</sup>Митрофанов А.А., <sup>1</sup>Чашин Е.А., <sup>2</sup>Балашова С.А.**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева», Ковров,  
e-mail: kanircha@list.ru;

<sup>2</sup>АО «ВНИИ «Сигнал», Ковров, e-mail: balashovasveta@list.ru

Работа направлена на решение задачи совершенствования существующих методов повышения стойкости инструментальной оснастки лазерной поверхностной обработкой. В связи с этим в работе приведены результаты исследований воздействия излучения нового перспективного типа лазеров, а именно непрерывных иттербиевых волоконных лазеров. На основании металлографических исследований определен характер воздействия лазерного излучения на структуру и эксплуатационные свойства поверхностного слоя инструментальной легированной стали 9ХС. Показано, что лазерная обработка в интервале плотностей энергии 7,33–26 Дж/мм<sup>2</sup> приводит к увеличению микротвердости поверхностных слоев инструментальной стали 9ХС. Также показано, что при обработке лазерным излучением без оплавления поверхности максимальная микротвердость формируется непосредственно на поверхности, а при обработке с оплавлением поверхности максимальная микротвердость формируется в нижележащих слоях и составляет 800–910 НВ. При этом глубина зоны упрочнения при обработке с оплавлением поверхности находится в пределах 1,2–1,4 мм, что в 2–6 раз больше, чем при обработке без оплавления поверхности. Также показано, что использование в технологических процессах излучения волоконных лазеров имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с твердотельным или газовым лазерным излучением.

**Ключевые слова:** лазерная поверхностная обработка, режимы лазерного воздействия, металлографическое исследование, микроструктура

**INCREASING THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF TOOL STEEL 9XC  
USING YTTERBIUM CONTINUOUS WAVE FIBER LASER**

**<sup>1</sup>Mitrofanov A.A., <sup>1</sup>Chaschin E.A., <sup>2</sup>Balashova S.A.**

<sup>1</sup>Kovrov State Technological Academy, Kovrov, e-mail: kanircha@list.ru;

<sup>2</sup>Joint-Stock Company «All-Russian Scientific-research institute “Signal”»,  
Kovrov, e-mail: balashovasveta@list.ru

The work is aimed at solving the problem of improving the existing methods of increasing the resistance of the tooling arrangement by laser surface treatment. In this regard, the paper presents the results of studies of the radiation influence of the new type of laser, namely ytterbium continuous wave (CW) fiber laser. The character of the radiation influence had been determined on the structure and service properties of the surface layer of alloy tool steel 9XC based on the metallographic examinations. It is shown that the laser treatment in the range of energy densities 7,33–26 J/mm<sup>2</sup> increases the microhardness of the surface layers of tool steel 9XC. As shown, the maximum microhardness is formed directly on the surface when the laser processing which occurs without surface melting. The maximum microhardness is formed in the lower layers, and equals 800–910 HV while processing a surface with melting. In doing so, hardening zone depth is within the area of 1,2–1,4 mm at a surface treatment with melting which is 2–6 times large than the surface treatment without melting. It's also shown that using of the fiber lasers radiation in the technological processes has several significant advantages compared to solid-state or gas laser radiation.

**Keywords:** laser surface treatment, laser effect modes, metallographic research, microstructure

Повышение стойкости инструментальной оснастки является весьма актуальной задачей [2]. В настоящее время достаточно широко используются технологии упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов, основанные на использовании высококонцентрированных источников энергии. К числу таких процессов поверхностного упрочнения и создания триботехнических покрытий относится метод поверхностного модифицирования с использованием энергии лазерного излучения. Большие технологические возможности лазерной термообработки определяются высокой степенью

локализации термического воздействия, получением упрочненных поверхностных слоев без использования закалочных сред, снижением деформации обрабатываемых деталей, возможностью обработки поверхностей труднодоступных участков, отсутствием контакта с обрабатываемым материалом и возможностью автоматизации процесса [6–7]. Однако применяемые до последнего времени лазерные технологические комплексы, использующие в качестве активных сред газовые смеси или твердотельные элементы, обладают определенными недостатками. Во-первых, невысокий

КПД – до 10%, во-вторых, необходимость нанесения поглощающих покрытий при обработке непрерывным излучением CO<sub>2</sub> – лазера, в-третьих, относительно невысокая производительность процесса импульсного упрочнения, связанная с необходимостью перекрытия пятен лазерного излучения.

Разработка физических основ и интенсивное развитие волоконной лазерной техники [3] позволяют значительно расширить возможности лазерных технологий, в том числе и в области лазерного термоупрочнения.

Волоконные лазеры обладают рядом преимуществ, позволяющих повысить их технологическую эффективность:

- длина волны (1,07 мкм), обеспечивающая возможность обработки без использования поглощающих покрытий;
- высокое качество излучения;
- подвод излучения к оптической головке по оптическому волокну;
- высокая энергетическая эффективность (КПД до 30%);
- отсутствие рабочих газов;
- минимальные затраты на обслуживание и эксплуатацию.

В работах [1, 4, 8] представлены результаты исследований по лазерной маркировке и лазерной сварке с использованием волоконных лазеров. При этом вопрос о поверхностном упрочнении с использованием излучения волоконных лазеров остается во многом неизученным.

### Научная новизна

В данной работе приведены результаты исследования упрочнения поверхностно-

го слоя образцов инструментальной стали 9ХС с использованием излучения волоконного лазера. В качестве источника излучения использовался иттербиевый волоконный лазер ЛС-4, с длиной волны излучения  $\lambda = 1070$  нм. Для оценки воздействия лазерного излучения на микроструктуру и микротвердость зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) обработка проводилась, как с оплавлением, так и без оплавления поверхностного слоя. Диапазон изменения плотности энергии излучения находился в пределах  $E = 7,3–26$  Дж/мм<sup>2</sup>, что осуществлялось путем варьирования мощности излучения и скорости относительного перемещения. Исходная микротвердость экспериментальных образцов, изготовленных из стали 9ХС, составляла 610–650 НВ.

### Материалы и методы исследования

Измерение распределения микротвердости по глубине ЗЛВ проводилось на твердомере НVC-1000. Для исследования микроструктуры использовался металлографический микроскоп NIKON EPIPHOT 200.

Исследование микроструктуры упрочненного слоя (рис. 1) показало, что в общем случае зона лазерного воздействия имеет слоистое строение.

Верхняя часть – зона оплавления – представляет собой сочетание мартенсита закалки и остаточного аустенита. Ниже располагается зона термического влияния (ЗТВ), в которой основной структурной составляющей является мартенсит закалки, при наличии нерастворившихся карбидов исходной структуры. Причем из-за высоких скоростей охлаждения мартенсит, формирующийся в этой зоне, является скрытокристаллическим. Наличие переходной зоны металлографическими исследованиями выявить не удалось, но измерения микротвердости показали разупрочнение нижних слоев ЗТВ по сравнению с твердостью исходной структуры.

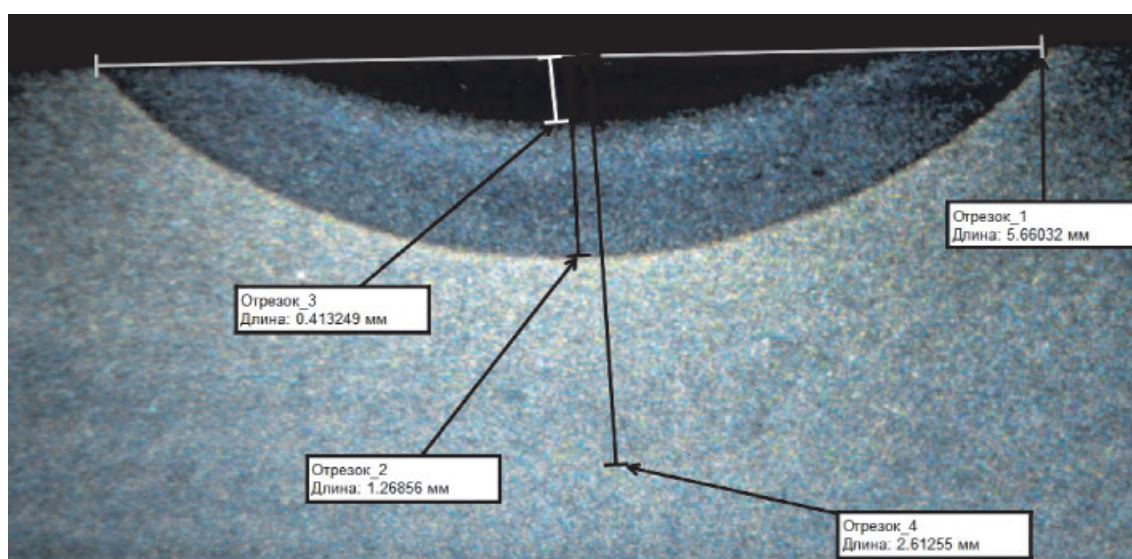


Рис. 1. Микроструктура зоны лазерного воздействия, полученная в результате обработки с оплавлением поверхности с плотностью энергии излучения,  $E = 22$  Дж/мм<sup>2</sup>

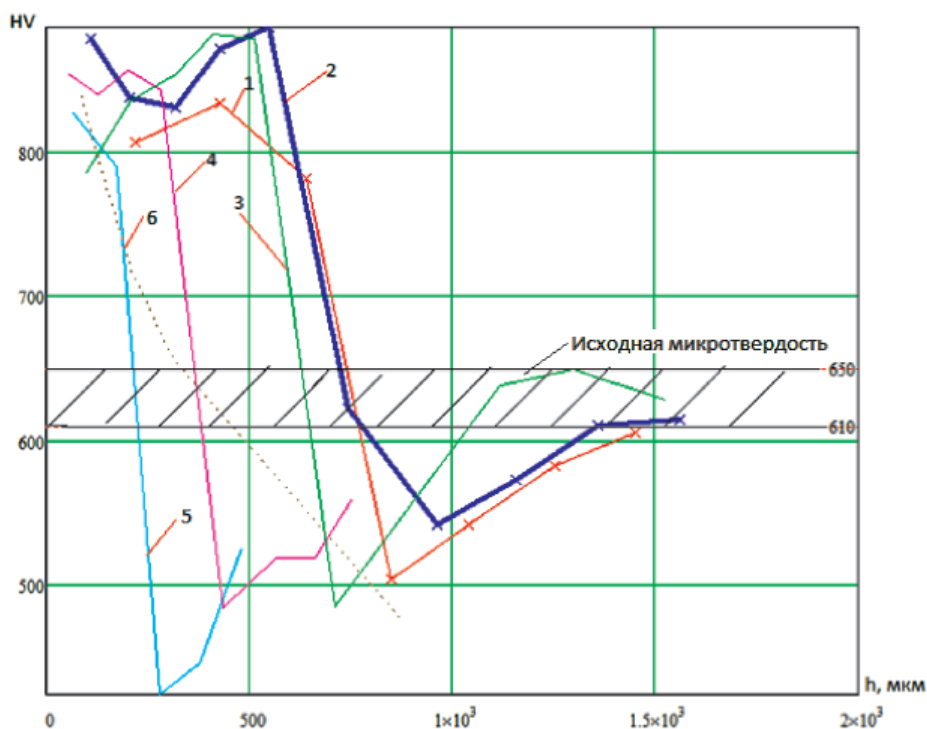


Рис. 2. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя после обработки без оплавления поверхности:  
 1 – обработка с плотностью энергии,  $E = 12 \text{ Дж/мм}^2$ ; 2 – обработка с плотностью энергии,  $E = 13 \text{ Дж/мм}^2$ ; 3 – обработка с плотностью энергии,  $E = 11 \text{ Дж/мм}^2$ ;  
 4 – обработка с плотностью энергии,  $E = 8 \text{ Дж/мм}^2$ ; 5 – обработка с плотностью энергии,  $E = 7,33 \text{ Дж/мм}^2$ ; 6 – обработка с плотностью энергии,  $E = 8,66 \text{ Дж/мм}^2$

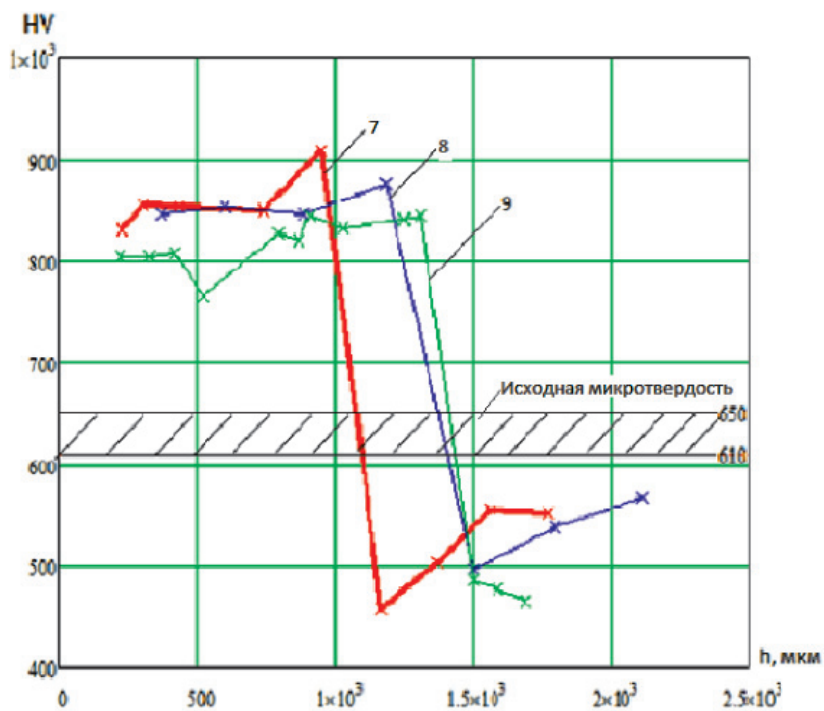


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя после обработки с оплавлением поверхности:  
 1 – обработка с плотностью энергии,  $E = 24 \text{ Дж/мм}^2$ ; 2 – обработка с плотностью энергии,  $E = 22 \text{ Дж/мм}^2$ ; 3 – обработка с плотностью энергии,  $E = 26 \text{ Дж/мм}^2$

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерения распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя стали 9ХС приведены на рис. 2, 3.

Из рис. 2 видно, что при обработке без оплавления поверхности с плотностью энергии 7,33–13 Дж/мм<sup>2</sup> максимальное значение микротвердости формируется на поверхности и с увеличением плотности энергии до  $E = 13$  Дж/мм<sup>2</sup> достигает 886 НВ, при исходной микротвердости 610–650 НВ. Глубина зоны упрочнения находится в интервале 200–700 мкм.

2. Лазерная обработка должна проводиться без оплавления поверхности.

Последнее требование обусловлено тем, что лазерное термоупрочнение целесообразно проводить как финишную операцию, сохраняя сформированные ранее геометрические параметры и шероховатость упрочняемых поверхностей.

Исходя из этих требований наиболее приемлемым из исследованных режимов лазерной обработки является обработка без оплавления поверхности с плотностью энергии  $E = 13$  Дж/мм<sup>2</sup>, так как в этом случае формируется структура

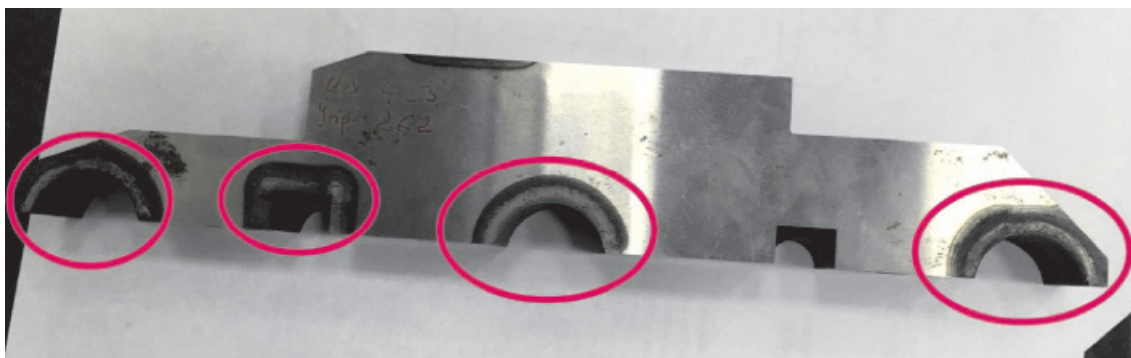


Рис. 4. Упрочненные поверхности детали пресс-формы, обработанные без оплавления поверхности лазерным излучением с плотностью энергии,  $E = 13$  Дж/мм<sup>2</sup>

В то же время при обработке с оплавлением поверхности (рис. 3) с плотностью энергии 22–26 Дж/мм<sup>2</sup> максимальное значение микротвердости наблюдается не на поверхности, а в нижележащих слоях. Максимальное значение микротвердости 909 НВ, при исходной микротвердости 610–650 НВ, получено при обработке с плотностью энергии 24 Дж/мм<sup>2</sup> на глубине около 1 мм. Причем глубина зоны упрочнения при обработке с оплавлением поверхности находится в пределах 1,2–1,4 мм. Что в 2–6 раз больше, чем при обработке без оплавления поверхности.

В целях апробации полученных результатов зависимости микротвердости поверхностного слоя инструментальной стали 9ХС от параметров лазерного воздействия было выполнено упрочнение рабочих поверхностей деталей пресс-форм, применяемых для изготовления деталей из пластмасс.

Для проведения лазерного упрочнения элементов пресс-форм были сформулированы следующие технические требования:

1. Обеспечение максимального значения микротвердости непосредственно на поверхности.

с максимальными значениями микротвердости 886 НВ и сохраняется исходный микрорельеф обрабатываемой поверхности. На рис. 4 представлен внешний вид обрабатываемой детали, с выделенными упрочненными поверхностями.

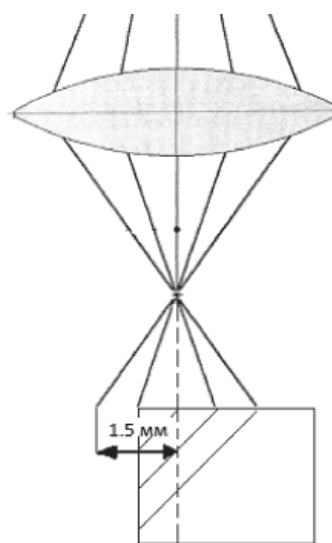


Рис. 5. Схема фокусировки и расположения лазерного луча относительно обрабатываемых поверхностей

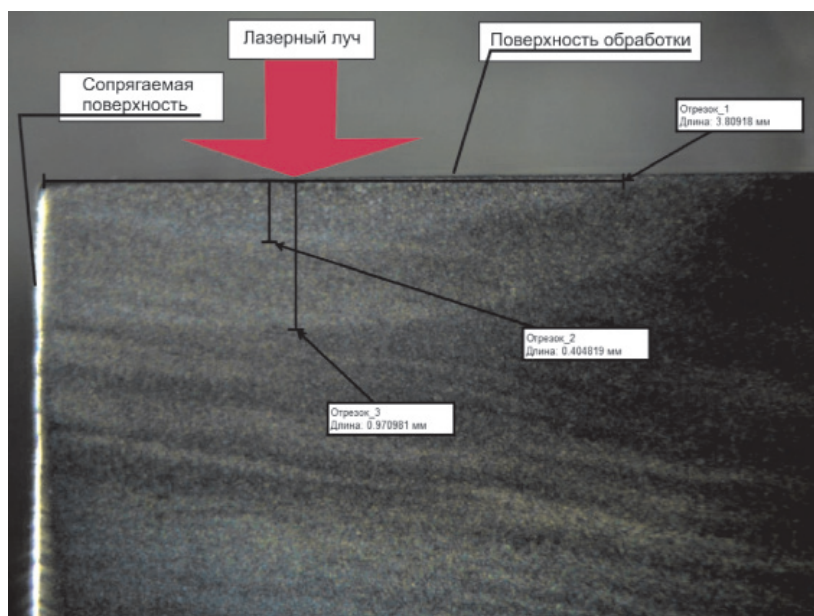


Рис. 6. Микроструктура зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) упрочненной детали

Кроме того, важное значение имеет расположение пятна лазерного излучения относительно рабочей кромки получаемой и сопрягаемой поверхности. Для получения наибольших значений глубины зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) на сопрягаемой поверхности необходимо смещать ось лазерного луча по поверхности обработки к рабочей кромке. Схема фокусировки и расположения лазерного луча относительно обрабатываемых поверхностей представлена на рис. 5.

Микроструктура ЗЛВ упрочненной детали представлена на рис. 6. Видно, что максимальная глубина зоны лазерного воздействия, составляющая 970 мкм, формируется в осевом сечении лазерного луча, незначительно уменьшаясь на поверхности сопрягаемой плоскости.

### Заключение

Установлено, что лазерная обработка в интервале плотностей энергии 7,33–26 Дж/мм<sup>2</sup> приводит к увеличению микротвердости поверхностных слоев инструментальной стали 9ХС. При обработке без оплавления поверхности с плотностью энергии 7,33–13 Дж/мм<sup>2</sup> максимальная микротвердость формируется непосредственно на поверхности и составляет 790–890 НВ. При обработке с оплавлением поверхности с плотностью энергии 22–26 Дж/мм<sup>2</sup> максимальная микротвер-

дость формируется в нижележащих слоях и составляет 800–910 НВ.

Глубина зоны упрочнения при обработке с оплавлением поверхности находится в пределах 1,2–1,4 мм, что в 2–6 раз больше, чем при обработке без оплавления поверхности.

Кроме того, сформулированы технические требования для проведения процесса лазерного упрочнения деталей инструментальной оснастки.

### Список литературы

1. Валиулин А., Горный С., Гречко Ю., Патров М., Юдин К., Юевич В. Лазерная маркировка материалов // Фотоника. – 2007. – № 3. – С. 16–21.
2. Григорьянц А.Г. и др. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Дианов Е. М. Волоконная оптика: от систем связи к «нервным системам» // Вестник РАН. – 2007. – Т. 77. – № 8. – С. 714–718.
4. Игнатов А., Криворотов В., Миргородский В. Лазерные сварные соединения из коррозионно-стойких сталей // Фотоника. – 2010 – № 2. – С. 18–21.
5. Митрофанов А.А., Чашин Е.А. Обработка газотермических покрытий непрерывным излучением СО<sub>2</sub>-лазера // Вестник машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 25–27.
6. Митрофанов А.А., Чашин Е.А., Балашова С.А. Обработка газотермических покрытий с использованием лазерного излучения // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 103–105.
7. Федин А.В., Митрофанов А.А., Чашин Е.А. Использование комбинированного лазерного излучения для повышения стойкости режущего инструмента // Изв. Академии наук. Сер. физическая. – 2001. – т. 65. – № 6. – С. 926–928.
8. Шиганов И., Холопов А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Фотоника. – 2010. – № 3. – С. 6–10.