

## Оптимальная схема лазерного упрочнения вершины режущего клина инструмента

© 2021

**Ярьско Сергей Игоревич**<sup>\*1,2,3</sup>, доктор технических наук,  
заведующий лабораторией лазерно-индуцированных процессов,  
профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»

**Балакиров Сергей Николаевич**<sup>1</sup>, инженер

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара (Россия)

<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет, Самара (Россия)

\*E-mail: yarsi54@gmail.com

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5299-886X>

**Аннотация:** Лазерная термообработка является одним из эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик металлорежущего инструмента. В практике лазерного упрочнения существует несколько методов выбора режима обработки: экспериментальный, расчетный, по справочным данным. Перспективным для оценки параметров зоны обработки является применение метода конечных элементов, использование которого наиболее востребовано для расчета температурного поля сложнопрофильного инструмента. При организации процесса упрочнения наиболее сложными являются выбор и назначение режимов обработки вершины режущего клина. В связи с этим решение многофакторной задачи оптимизации схемы упрочнения области около вершины инструмента актуально при проектировании и автоматизации процесса лазерного упрочнения лезвийного инструмента. В работе методом конечных элементов в программе ANSYS Workbench на примере инструмента с углом заострения 60° проведены численные эксперименты по оптимизации схемы упрочняющей лазерной обработки вершины режущего клина инструмента. Рассмотрено три варианта схемы упрочнения. Первый из них заключается в реализации многократной обработки области, примыкающей к вершине инструмента. Второй состоит в попеременном перемещении пятна лазерной обработки вдоль режущих кромок в области вершины инструмента. Согласно третьему варианту пятна обработки последовательно располагались вдоль биссектрисы угла при вершине инструмента. Показано, что по критерию максимальной глубины оптимальной является схема упрочнения, заключающаяся в попеременном перемещении пятна лазерной обработки вдоль режущих кромок в области вершины инструмента. В этом случае обеспечиваются характеристики зоны упрочнения, превосходящие аналогичные величины, описывающие зону упрочнения для остальных вариантов лазерной обработки вершины режущего клина инструмента.

**Ключевые слова:** лазерное упрочнение; моделирование; метод конечных элементов; вершина резца; лазерная обработка; зона лазерного воздействия; пятно лазерной обработки.

**Для цитирования:** Ярьско С.И., Балакиров С.Н. Оптимальная схема лазерного упрочнения вершины режущего клина инструмента // Frontier Materials & Technologies. 2021. № 4. С. 98–106. DOI: 10.18323/2782-4039-2021-4-98-106.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик металлообрабатывающего инструмента является импульсная упрочняющая лазерная обработка (ЛО), наиболее широко применяемая в мелкосерийном инструментальном производстве. В условиях современного машиностроительного предприятия на первый план выходит задача разработать общие рекомендации по организации технологического процесса лазерного упрочнения, позволяющие обеспечить его автоматизацию, а также условия и режимы обработки, при которых достигаются требуемые характеристики зоны лазерного воздействия (ЗЛВ).

С достаточной для практического применения точностью рассчитать режимы ЛО, необходимые для проектирования технологических процессов лазерного упрочнения, позволяют простые аналитические зависимости [1–3]. Для определения рабочих параметров и режимов ЛО может быть использовано моделирование процесса, основанное либо на решении задачи тепло-

проводности, либо на анализе полиморфного превращения [4–6]. Однако ЛО режущих инструментов имеет свои специфические особенности, обусловленные условиями применения и геометрией инструмента, что оказывает существенное влияние на формирование температурного поля в ЗЛВ. В этом случае аналитически определить распределение температурного поля в режущем клине инструмента и энергетические характеристики лазерного излучения (ЛИ) в зависимости от местоположения лазерного источника не представляется возможным. Достаточно полное исследование может быть проведено на основании численных расчетов.

CAE-системы на основе метода конечных элементов (КЭ) находят применение при проектировании и оптимизации существующих технологических процессов металлообработки, изучении контактного взаимодействия и характеристик процесса трения [7–9], анализе температурного поля и напряженного состояния инструмента при различных видах механической обработки, например при фрезеровании [10; 11] или штамповке [12]. Использование КЭ-моделирования при анализе

процессов металлообработки достаточно продуктивно и позволяет не только определить оптимальные параметры процесса резания и конструкций режущего инструмента [8], но и прогнозировать износостойкость материалов в зависимости от условий эксплуатации [9]. В современных условиях машиностроительного производства метод КЭ является наиболее подходящим инструментом для получения необходимых знаний о производственных процессах [7]. В частности, при изучении фрезерования с помощью КЭ-модели был разработан комплекс мероприятий для повышения стабильности станков [10], а в результате моделирования температурного поля и поля деформаций была обеспечена техническая основа для высокоточной обработки прецизионных микродеталей [11].

Многофункционально, многообразно и высокоэффективно применение метода КЭ при проектировании процессов ЛО материалов, включая жаропрочные и легированные стали, композиты, сплавы цветных металлов. При разработке лазерных технологий метод КЭ применяется для численного анализа процесса лазерной резки, выбора и оценки режимов обработки, параметров, характеризующих зону нагрева и качество реза [13; 14], анализа температурных полей при термообработке как импульсным [15], так и непрерывным излучением, например, легированных сталей [16–18], титановых сплавов [19]. Используя метод КЭ, возможно прогнозировать распределение температуры для достижения однородного по глубине ЗЛВ упрочненного слоя [16; 18], анализировать и определять параметры ЛИ, обеспечивающие требуемые параметры ЗЛВ, качество и глубину зоны закалки [15; 18; 19]. Таким образом, в технологии ЛО метод КЭ служит эффективным инструментом определения оптимальных технологических режимов обработки. Однако имеющиеся результаты расчета температурных полей и характеристик ЗЛВ методом КЭ невозможно обобщить для тел произвольной формы, что не позволяет использовать эти результаты для прогнозирования и выбора характеристик ЛИ при упрочнении металлорежущего инструмента.

В технологии упрочняющей ЛО мелкогабаритного инструмента компьютерное проектирование в основном рассматривается с точки зрения назначения режимов ЛО и организации процесса упрочнения, в том числе и сложнопрофильного инструмента. Однако наиболее важно применение метода КЭ при упрочняющей ЛО вершины режущего клина инструмента как наиболее нагруженного его элемента. Последнее имеет свои особенности и оказывает существенное влияние на работоспособность инструмента. При ЛО вершины режущего клина определенную сложность вызывает невозможность однозначного выбора расположения источника тепла на обрабатываемой поверхности, принимая во внимание геометрию режущего клина и пространственные, временные и энергетические характеристики ЛИ. Эту сложность удается устранить, используя при анализе температурного поля при лазерном нагреве КЭ-моделирование [20; 21].

Цель работы – выбор оптимальной схемы упрочнения области около вершины режущего клина инструмента по критерию обеспечения максимальной глубины упрочнения на основе анализа температурного поля при импульсной лазерной обработке.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

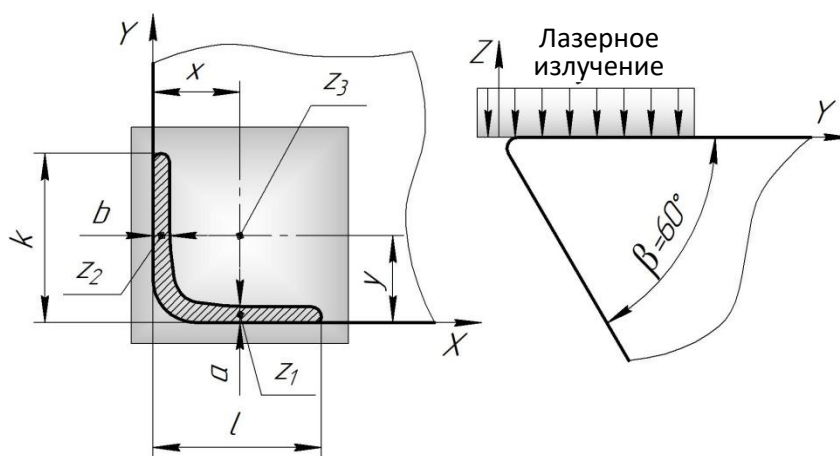
Использование КЭ-моделирования в настоящей работе, как и в [20; 21], основано на схеме нагрева режущего клина инструмента сосредоточенным поверхностным тепловым источником с равномерным распределением плотности мощности по сечению пучка. Для данной схемы нагрева была разработана КЭ-модель расчета температурного поля, учитывающая пространственное и временное распределение плотности мощности источника нагрева [20]. Данный подход был использован при моделировании однократной ЛО вершины резца [21]. При этом вопрос об оптимальности рекомендованной схемы ЛО остается открытым. Поэтому предложенный ранее подход получил свое развитие в настоящей работе.

Методом КЭ в программе ANSYS Workbench в трехмерной постановке моделировался нагрев передней поверхности режущего клина инструмента с углом заострения  $\beta=60^\circ$ , радиусом скругления между главной и вспомогательной режущими кромками  $R=0,8$  мм. Тип анализа – переходный тепловой (Transient Thermal) с автоматическим выбором числа подшагов. Размер сетки КЭ для основного тела задавался 0,5 мм, для зоны ЛО – 0,05 мм. Как и в [20], лазерный импульс моделировался треугольной формы длительностью 10 мс с равномерным распределением плотности мощности ЛИ по сечению лазерного пятна. Задача решалась в три шага: на первом рассматривалась стадия нагрева с линейным возрастанием тепловой нагрузки до ее максимального значения; на втором приложенная нагрузка уменьшалась от максимума до нуля; на третьем моделировалась стадия остывания. Суммарное время первых двух шагов составило 0,01 с, при этом время каждого из них – 0,005 с. Время остывания – 1 с. Область лазерного воздействия на передней поверхности инструмента (рис. 1) была представлена в виде квадратного пятна с равномерным распределением плотности мощности размером 4×4 мм. Приложение тепловой нагрузки было реализовано с помощью подведения теплового потока Heat Flux. Схема расположения пятна ЛО и измеряемые параметры приведены на рис. 1.

Вариант моноимпульсной ЛО вершины резца был рассмотрен в [21]. Здесь детально описан процесс выбора оптимального с точки зрения обеспечения максимальной глубины положения центра пятна ЛО. Максимальная глубина зоны упрочнения в вершине инструмента, равная 138 мкм, достигается при расположении центра пятна ЛО в точке с координатами  $x=1,5$  мм,  $y=1,6$  мм (рис. 2 а). При такой схеме ЛО плотность мощности ЛИ равна  $1,56 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, значения величин  $l$  и  $k$  соответственно равны 2,931 и 2,922 мм, протяженность зоны упрочнения в диагональном сечении составляет 0,32 мм, максимальная глубина упрочнения на главной задней поверхности  $z_1=58$  мкм, а на вспомогательной задней поверхности –  $z_2=61$  мкм. Во всех последующих расчетах данное положение пятна ЛО было принято за исходное (базовое).

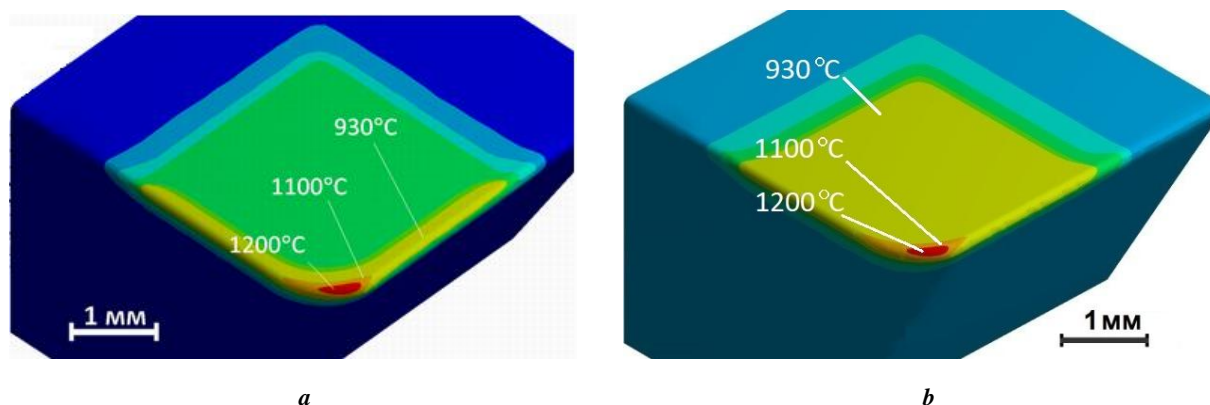
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе при выборе оптимальной схемы упрочняющей ЛО вершины режущего клина инструмента было рассмотрено три способа организации



**Рис. 1.** Расположения пятна лазерной обработки относительно вершины режущего клина инструмента и измеряемые параметры:  $l$ ,  $a$  и  $b$  – длина и ширина упрочненной зоны вдоль главной и вспомогательной режущих кромок соответственно;  $z$  – глубина упрочненной зоны ( $1, 2, 3$  – места замера глубины). Значения  $k$  и  $l$  определяют расстояние от начала системы координат до края упрочненной зоны на кромках режущего клина

**Fig. 1.** Laser treatments spot location with respect of a tool cutting wedge tip and measured parameters:  $l$ ,  $a$  and  $b$  – the length and width of a hardened area along the main and minor cutting edges respectively;  $z$  – hardened area depth ( $1, 2, 3$  – depth measurement points).  $k$  and  $l$  values govern the distance from the coordinate origin to the hardened zone border on the tool wedges



**Рис. 2.** Распределение температуры на передней поверхности инструмента в области вершины:

*a* – при моноимпульсной обработке [21] ( $x=1,5$  мм,  $y=1,6$  мм);

*b* – при лазерной обработке по схеме № 1 после 16-го импульса

**Fig. 2.** Temperature distribution on the tool front surface in the tip area:

*a* – at monopulse treatment [21] ( $x=1.5$  mm,  $y=1.6$  mm);

*b* – at laser treatment according to scheme No. 1 after the sixteenth pulse signal

расположения пятен ЛО на передней поверхности резца в области его вершины.

**Схема 1.** Многократное облучение. Положение центра пятна ЛО ( $x=1,5$  мм,  $y=1,6$  мм) в процессе обработки не меняется и, как уже отмечалось, является оптимальным при моноимпульсной обработке. Число импульсов изменялось от 1 до 16. Распределение температуры в области вершины резца на его передней поверхности показано на рис. 2 б. Глубина зоны упрочнения здесь и далее рассчитывалась как глубина опускания изотермы  $930^\circ\text{C}$  при обработке стали P18 [20] для режимов ЛО, исключаящих оплавление поверхности.

**Схема 2.** Попеременное перемещение пятна ЛО вдоль режущих кромок.

Первый импульс: координаты центра пятна:  $x=1,5$  мм,  $y=1,6$  мм совпадают с оптимальным положением центра пятна ЛО для моноимпульсной обработки. При этом, как и раньше, на поверхности ЗЛВ температура не превышает температуру плавления для стали P18, равную  $1260^\circ\text{C}$ .

Второй импульс: пятно смещается на 0,8 мм вдоль главной режущей кромки относительно оптимального положения. Координаты центра пятна:  $x=2,3$  мм,  $y=1,6$  мм. При таком положении пятна ЛО зона упрочнения на поверхности инструмента в области его вершины характеризуется величинами, приведенными в таблице 1.

Третий импульс: пятно смещается на 0,8 мм вдоль вспомогательной режущей кромки относительно

**Таблица 1.** Параметры зоны упрочнения при лазерной обработке по схеме № 2  
**Table 1.** Hardening zone parameters at laser treatment according to scheme No. 2

<i>a</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>l</i> , мм	<i>k</i> , мм	<i>z</i> <sub>1</sub> , мкм	<i>z</i> <sub>2</sub> , мкм	<i>z</i> <sub>3</sub> , мкм	Плотность мощности, Вт/м <sup>2</sup>
после 2-го импульса							
2,94	3,74	3,83	0	119	0	27	1,870·10 <sup>8</sup>
после 3-го импульса							
3,79	2,9	0	2,9	0	99	23	1,768·10 <sup>8</sup>
после 4-го импульса							
3,29	3,32	3,32	0	63	0	65	2,090·10 <sup>8</sup>

Примечание. После 1-го импульса геометрические параметры зоны ЛО соответствуют характеристикам, достигаемым при оптимальном положении центра пятна при моноимпульсной обработке.

оптимального положения. Координаты центра пятна:  $x=1,5$  мм,  $y=2,4$  мм. Параметры зоны упрочнения после ЛО третьим импульсом приведены в таблице 1.

Четвертый импульс: пятно смещается по диагонали от оптимального положения на 0,3 мм вдоль главной и вспомогательной режущих кромок. Координаты центра пятна:  $x=1,8$  мм,  $y=1,9$  мм. Значения величин, характеризующих зону упрочнения после обработки четвертым импульсом, приведены в таблице 1. Распределение температуры на передней поверхности инструмента по окончании четвертого импульса показано на рис. 3.

**Схема 3.** Упрочнение реализуется последовательным смещением пятен обработки вдоль биссектрисы угла при вершине инструмента. Центр первого пятна ЛО, как и ранее, располагался в точке с координатами  $x=1,5$  мм,  $y=1,6$  мм. Было проанализировано несколько вариантов смещения центра пятна вдоль направления биссектрисы угла при вершине инструмента относительно центра предыдущего пятна и определены геометрические характеристики ЗЛВ:

– вариант 1: дополнительная двукратная ЛО со смещением каждого пятна относительно предыдущего на  $\Delta=0,1$  мм;

– вариант 2: дополнительная двукратная ЛО со смещением каждого пятна относительно предыдущего на  $\Delta=0,2$  мм;

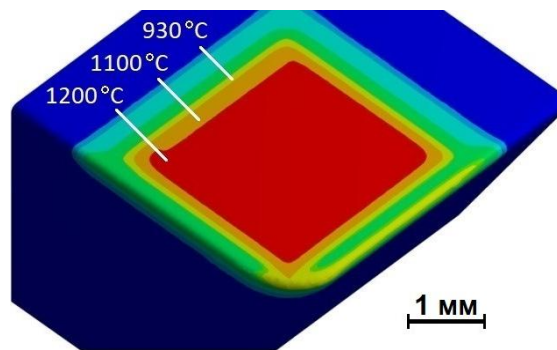
– вариант 3: дополнительная двукратная ЛО со смещением каждого пятна относительно предыдущего на  $\Delta=0,5$  мм;

– вариант 4: дополнительная четырехкратная ЛО со смещением каждого пятна относительно предыдущего на  $\Delta=0,05$  мм.

Основные геометрические характеристики зоны ЛО при различных вариантах смещения центра пятна приведены в таблице 2.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным КЭ-моделирования при схеме обработки № 1 максимальная глубина упрочнения на главной задней поверхности в точке  $z_1$  достигает значения 103 мкм при длине зоны упрочнения вдоль главной режущей кромки  $l=2,85$  мм, а на вспомогательной задней поверхности в точке  $z_2$  – 87 мкм при длине зоны упрочнения вдоль вспомогательной режущей кромки  $k=2,81$  мм (рис. 2 б). Однако на расстоянии от вершины вдоль



**Рис. 3.** Распределение температуры на передней поверхности инструмента в области вершины по окончании четвертого импульса лазерной обработки при схеме обработки № 2  
**Fig. 3.** Temperature distribution on the tool front surface in the tip area at the end of the fourth pulse signal of laser treatment according to scheme No. 2



**Таблица 2.** Ключевые характеристики процесса лазерной обработки по схеме № 3  
**Table 2.** Key characteristics of the laser treatment process according to scheme No. 3

№ варианта ЛО	Плотность мощности, $\times 10^8$ Вт/м <sup>2</sup>	Геометрические характеристики зоны ЛО			
		<i>l</i> , мм	<i>k</i> , мм	<i>a</i> ** , мм	<i>b</i> ** , мм
1	1 импульс – 1,563 2 импульс – 1,600 3 импульс – 1,790	2,93	2,94	0,23+2,9	0,23+2,90
2	1 импульс – 1,563 2 импульс – 1,830 3 импульс – 2,150	2,91	2,92	0,23+3,17	0,23+3,17
3	1 импульс – 1,563 2 импульс – 2,105 3 импульс – 2,130	2,85	2,88	0,23+3,17	0,23+3,17
4	1 импульс – 1,563 2 импульс – 1,556 3 импульс – 1,560 4 импульс – 1,600 5 импульс – 1,710	2,95	2,94	0,23+2,9	0,23+2,90

\* Значения величин  $z_1=53$  мкм и  $z_2=66$  мкм для всех вариантов ЛО в основном совпадают с соответствующими значениями, характерными для моноимпульсной обработки.

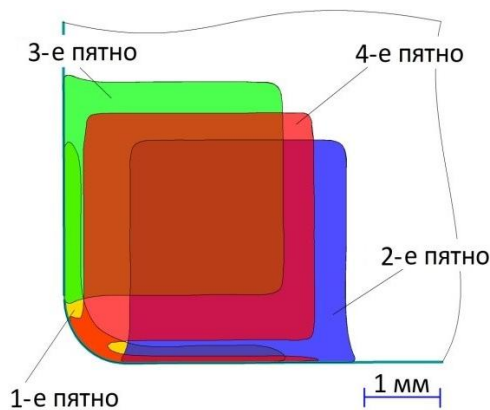
\*\* Знак «+» в приведенном значении ширины упрочненной зоны вдоль обеих рассматриваемых режущих кромок означает наличие составной зоны упрочнения с неупрочненным участком между зонами упрочнения (см., например, рис. 5).

биссектрисы угла при вершине, превышающем 220 мкм, глубина упрочнения резко падает и в центре пятна ЛО в точке  $z_3$  составляет не более 12 мкм. Многократная ЛО при схеме упрочнения № 1 проводится при постепенном уменьшении плотности мощности ЛИ от  $1,56 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> для 1-го импульса до  $1,12 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> для 16-го импульса.

При импульсной ЛО с перекрытием по схеме № 2 на передней поверхности инструмента в области его вершины образуется зона, представляющая собой суперпозицию геометрических образов всех зон ЛО по окончании действия 4-го импульса. В этом случае ее вид показан на рис. 4.

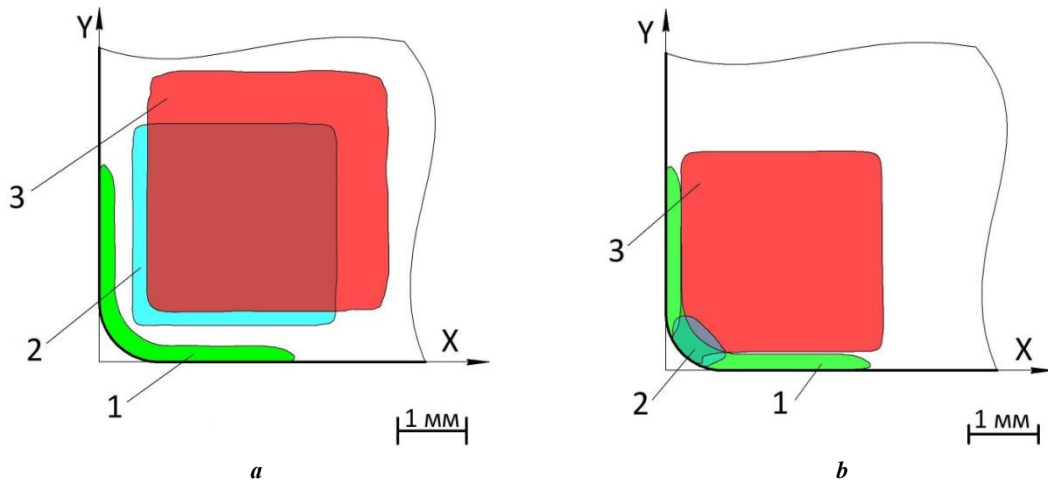
Согласно результатам КЭ-моделирования при такой схеме обработки обеспечиваются следующие параметры зоны упрочнения:

- максимальная глубина на передней режущей кромке – 119 мкм;
- максимальная глубина на вспомогательной режущей кромке – 99 мкм;
- глубина в центре пятна – 65 мкм;
- протяженность вдоль главной режущей кромки – 3,83 мм;
- протяженность вдоль вспомогательной режущей кромки – 3,79 мм.



**Рис. 4.** Внешний вид поверхности зоны лазерного воздействия как суперпозиции четырех импульсов при обработке по схеме № 2

**Fig. 4.** Surface appearance of the laser impingement point as the superposition of four pulse signals when processing according to scheme No. 2



**Рис. 5.** Вид поверхности зоны упрочнения в области вершины после лазерной обработки по схеме № 3: *a* –  $\Delta=0,5$  мм; *b* –  $\Delta=0,1$  мм (цифрами 1, 2, 3 обозначены участки поверхности зоны лазерного воздействия после лазерной обработки одним, двумя и тремя импульсами соответственно)

**Fig. 5.** View of the hardening zone surface in the tip area after laser treatment according to scheme No. 3: *a* –  $\Delta=0.5$  mm; *b* –  $\Delta=0.1$  mm (figures 1, 2, and 3 indicate the areas of the laser impingement zone after laser treatment by one, two, and three pulse signals respectively)

Для схемы ЛО № 3 наиболее существенными отличиями для рассмотренных вариантов являются наличие упрочненной зоны в центре пятна глубиной  $z_3=28-30$  мкм для вариантов 1 и 4 из таблицы 2 и наличие упрочненной зоны глубиной  $z_3=60-66$  мкм для вариантов 2 и 3 из таблицы 2. Это существенно больше, чем при многократной обработке, и сравнимо с глубиной упрочнения в центре пятна при лазерной обработке по схеме № 2, где  $z_3=65$  мкм.

Однако такая схема обработки приводит к появлению неупрочненных участков в направлении от режущих кромок к центру пятна (рис. 5). Причем размер этих участков увеличивается с ростом величины смещения вдоль биссектрисы угла при вершине. Например, при удалении в направлении оси *X* от вспомогательной режущей кромки их ширина составляет 260 мкм при смещении  $\Delta=0,5$  мм (рис. 5 а), 27 мкм при смещении  $\Delta=0,2$  мм, при смещении  $\Delta=0,1$  мм ширина неупрочненной зоны не более 20 мкм (рис. 5 б) и при смещении  $\Delta=0,05$  мм – 6 мкм. Такая конфигурация зон упрочнения (рис. 5) на поверхности ЗЛВ делает невозможным использование схемы № 3 для упрочнения вершины режущего клина инструмента. Неоднородность температуры по глубине ЗЛВ приводит не только к неоднородности глубины ЗЛВ, но и к неоднородности структуры и свойств зоны обработки по глубине [22]. Эти факторы обуславливают снижение надежности и долговечности инструмента.

Как уже отмечалось, при данной схеме обработки значения глубины ЗЛВ сравнимы с глубиной, наблюдаемой при ЛО по схеме № 2. Однако данный вариант организации расположения пятен ЛО неприемлем для обработки вершины режущего клина инструмента из-за наличия вдоль режущих кромок неупрочненных участков, находящихся от них на удалении 0,2–0,3 мм (рис. 5).

Итак, сравнение результатов КЭ-моделирования импульсной ЛО вершины режущего клина инструмента

показывает, что по критерию обеспечения наибольшей глубины упрочнения оптимальной является схема обработки, при которой пятно ЛО попеременно перемещается вдоль режущих кромок в области вершины.

## ВЫВОДЫ

1. С использованием конечно-элементного моделирования при анализе температурного поля при импульсной лазерной обработке области около вершины режущего клина инструмента рассмотрено три способа организации расположения пятен лазерной обработки на передней поверхности резца в области его вершины.

2. Установлено, что по критерию обеспечения максимальной глубины упрочнения оптимальной является схема упрочнения, заключающаяся в попеременном перемещении пятна лазерной обработки вдоль режущих кромок в области вершины инструмента. В этом случае максимальная глубина у передней режущей кромки составляет 119 мкм, на вспомогательной режущей кромке – 99 мкм, а в центре пятна – 65 мкм, что превосходит аналогичные характеристики остальных рассмотренных вариантов лазерной обработки вершины режущего клина инструмента.

3. Результаты расчета оптимальных режимов и схемы лазерной обработки вершины режущего клина инструмента могут быть использованы при проектировании процесса лазерного упрочнения и при автоматизации процесса упрочнения лезвийного инструмента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Laser Materials Processing / eds. J.F. Ready, D.F. Farson, T. Feeley. Berlin: Springer, 2001. 715 p.
2. Advances in laser materials processing: technology, research and applications / ed. J.R. Lawrence. USA: Elsevier Science, 2017. 802 p.

3. Handbook of Laser Technology and Applications. Vol. 3: Applications / eds. C. Webb, J.D.C. Jones. USA: CRC Press, 2020. 1167 p.
4. Zohuri B. Thermal Effects of High Power Laser Energy on Materials. USA: Springer, 2021. 420 p.
5. Dobrzański L., Dobrzańska-Danikiewicz A. Applications of Laser Processing of Materials in Surface Engineering in the Industry 4.0 Stage of the Industrial Revolution // Materials Performance and Characterization. 2019. Vol. 8. № 6. P. 1091–1129. DOI: [10.1520/MPC20190203](https://doi.org/10.1520/MPC20190203).
6. Гладуш Г.Г., Смуров И.Ю. Физические основы лазерной обработки материалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. 592 с.
7. Klocke F., Beck T., Hoppe S., Krieg T., Muller N., Nothe T., Raedt H.W., Sweeney K. Examples of FEM application in manufacturing technology // Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 120. № 1-3. P. 450–457. DOI: [10.1016/S0924-0136\(01\)01210-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01210-9).
8. Криворучко Д.В., Залогова В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы. Сумы: Университетская книга, 2012. 496 с.
9. Roy S., Zhao J.N., Shrotriya P., Sundararajan S. Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel // Tribology International. 2017. Vol. 112. P. 94–102. DOI: [10.1016/j.triboint.2017.03.036](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.036).
10. Dunaj P., Marchelek K., Chodźko M. Application of the finite element method in the milling process stability diagnosis // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2019. Vol. 57. № 2. P. 353–367. DOI: [10.15632/jtam-pl/104589](https://doi.org/10.15632/jtam-pl/104589).
11. Peng Z.X., Li J., Yan P., Gao S.F., Zhang C.H., Wang X.B. Experimental and simulation research on micro-milling temperature and cutting deformation of heat-resistance stainless steel // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 95. № 5-8. P. 2495–2508. DOI: [10.1007/s00170-017-1091-6](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1091-6).
12. Byun J.B., Lee H.J., Park J.B., Seo I.D., Joun M.S. Fully coupled finite element analysis of an automatic multi-stage cold forging process // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 311 SSP. P. 88–93. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.311.88](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.311.88).
13. Muhsin N.M.B., Dhaher N.H. Finite Elements Analysis of Laser Cutting Process // NeuroQuantology. 2020. Vol. 18. № 5. P. 50–55. DOI: [10.14704/nq.2020.18.5.NQ20167](https://doi.org/10.14704/nq.2020.18.5.NQ20167).
14. Дьяченко Ю.В., Маковецкий А.В., Хитрых Е.Е. Численное моделирование процессов лазерной резки листовых авиационных материалов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сборник научных трудов. Харьков: ХАИ, 2014. Вып. 63. С. 104–114.
15. Wu W., Liang N.G., Gan C.H., Yu G. Numerical investigation on laser transformation hardening with different temporal pulse shapes // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200. № 8. P. 2686–2694. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2004.11.011](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.11.011).
16. Anusha E., Kumar A., Shariff S.M. Finite element analysis and experimental validation of high-speed laser surface hardening process // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 115. № 7-8. P. 2403–2421. DOI: [10.1007/s00170-021-07303-z](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07303-z).
17. Lyutikov Y.A., Lyuchter A.B., Korobov M.A. The influence of laser hardening on the performance of steel 30KHGSA by the finite elements method // Journal of Physics: Conference Series: III international conference on laser and plasma researches and technologies. 2017. Vol. 941. Article number 012041. DOI: [10.1088/1742-6596/941/1/012041](https://doi.org/10.1088/1742-6596/941/1/012041).
18. Fakir R., Barka N., Brousseau J., Caron-Guillemette G. Numerical Investigation by the Finite Difference Method of the Laser Hardening Process Applied to AISI-4340 // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2018. Vol. 6. № 10. P. 2087–2106. DOI: [10.4236/jamp.2018.610176](https://doi.org/10.4236/jamp.2018.610176).
19. Lu X., Lin X., Chiumenti M., Cervera M., Li J., Ma I., Wei L., Hu Y., Huang W. Finite element analysis and experimental validation of the thermomechanical behavior in laser solid forming of Ti-6Al-4V // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 21. P. 30–40. DOI: [10.1016/j.addma.2018.02.003](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.003).
20. Ярьско С.И., Горяинов Д.С. Формирование температурного поля в режущем клине инструмента при импульсной упрочняющей лазерной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 7. С. 30–36.
21. Yaresko S.I. Finite-Element Modeling in the Technology of Hardening Laser Processing of a Metal-Cutting Tool // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Vol. 92. № 2. P. 314–325. DOI: [10.1007/s10891-019-01935-5](https://doi.org/10.1007/s10891-019-01935-5).
22. Ярьско С.И., Михеев П.А., Каковкина Н.Г. Обеспечение равномерного распределения интенсивности лазерного излучения при импульсной термообработке с помощью неустойчивого резонатора // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 6. С. 19–25.

## REFERENCES

1. Ready J.F., Farson D.F., Feeley T., eds. *Handbook of Laser Materials Processing*. Berlin, Springer Publ., 2001. 715 p.
2. Lawrence J.R., ed. *Advances in laser materials processing: technology, research and applications*. USA, Elsevier Science Publ., 2017. 802 p.
3. Webb C., Jones J.D.C., eds. *Handbook of Laser Technology and Applications. Vol. 3: Applications*. USA, CRC Press Publ., 2020. 1167 p.
4. Zohuri B. *Thermal Effects of High Power Laser Energy on Materials*. USA, Springer Publ., 2021. 420 p.
5. Dobrzański L., Dobrzańska-Danikiewicz A. Applications of Laser Processing of Materials in Surface Engineering in the Industry 4.0 Stage of the Industrial Revolution. *Materials Performance and Characterization*, 2019, vol. 8, no. 6, pp. 1091–1129. DOI: [10.1520/MPC20190203](https://doi.org/10.1520/MPC20190203).
6. Gladush G.G., Smurov I.Yu. *Fizicheskie osnovy lazernoy obrabotki materialov* [Principal physics of laser treatment of materials]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2017. 592 p.
7. Klocke F., Beck T., Hoppe S., Krieg T., Muller N., Nothe T., Raedt H.W., Sweeney K. Examples of FEM application in manufacturing technology. *Journal of*

- Materials Processing Technology*, 2002, vol. 120, no. 1-3, pp. 450–457. DOI: [10.1016/S0924-0136\(01\)01210-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01210-9).
8. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. *Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy* [Cutting processes simulation by the finite elements method: methodological foundations]. Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2012. 496 p.
  9. Roy S., Zhao J.N., Shrotriya P., Sundararajan S. Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel. *Tribology International*, 2017, vol. 112, pp. 94–102. DOI: [10.1016/j.triboint.2017.03.036](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.036).
  10. Dunaj P., Marchelek K., Chodźko M. Application of the finite element method in the milling process stability diagnosis. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, vol. 57, no. 2, pp. 353–367. DOI: [10.15632/jtam-pl/104589](https://doi.org/10.15632/jtam-pl/104589).
  11. Peng Z.X., Li J., Yan P., Gao S.F., Zhang C.H., Wang X.B. Experimental and simulation research on micro-milling temperature and cutting deformation of heat-resistance stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, no. 5-8, pp. 2495–2508. DOI: [10.1007/s00170-017-1091-6](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1091-6).
  12. Byun J.B., Lee H.J., Park J.B., Seo I.D., Joun M.S. Fully coupled finite element analysis of an automatic multi-stage cold forging process. *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 311 SSP, pp. 88–93. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.311.88](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.311.88).
  13. Muhsin N.M.B., Dhaher N.H. Finite Elements Analysis of Laser Cutting Process. *NeuroQuantology*, 2020, vol. 18, no. 5, pp. 50–55. DOI: [10.14704/nq.2020.18.5.NQ20167](https://doi.org/10.14704/nq.2020.18.5.NQ20167).
  14. Dyachenko Yu.V., Makovetskiy A.V., Khitrykh E.E. Numerical modeling of the processes of laser cutting of sheet aircraft materials. *Otkrytye informatsionnye i kompyuternye integrirovannye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov*. Kharkov, KhAI Publ., 2014. Vyp. 63, pp. 104–114.
  15. Wu W., Liang N.G., Gan C.H., Yu G. Numerical investigation on laser transformation hardening with different temporal pulse shapes. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, no. 8, pp. 2686–2694. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2004.11.011](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.11.011).
  16. Anusha E., Kumar A., Shariff S.M. Finite element analysis and experimental validation of high-speed laser surface hardening process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 115, no. 7-8, pp. 2403–2421. DOI: [10.1007/s00170-021-07303-z](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07303-z).
  17. Lyutikov Y.A., Lyuchter A.B., Korobov M.A. The influence of laser hardening on the performance of steel 30KHGSA by the finite elements method. *Journal of Physics: Conference Series: III international conference on laser and plasma researches and technologies*, 2017, vol. 941, article number 012041. DOI: [10.1088/1742-6596/941/1/012041](https://doi.org/10.1088/1742-6596/941/1/012041).
  18. Fakir R., Barka N., Brousseau J., Caron-Guillemette G. Numerical Investigation by the Finite Difference Method of the Laser Hardening Process Applied to AISI-4340. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2018, vol. 6, no. 10, pp. 2087–2106. DOI: [10.4236/jamp.2018.610176](https://doi.org/10.4236/jamp.2018.610176).
  19. Lu X., Lin X., Chiumenti M., Cervera M., Li J., Ma I., Wei L., Hu Y., Huang W. Finite element analysis and experimental validation of the thermomechanical behavior in laser solid forming of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 21, pp. 30–40. DOI: [10.1016/j.addma.2018.02.003](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.003).
  20. Yaresko S.I., Goryainov D.S. Formation of a temperature field in a cutting wedge of the tool at pulse laser hardening. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2012, no. 7, pp. 30–36.
  21. Yaresko S.I. Finite-Element Modeling in the Technology of Hardening Laser Processing of a Metal-Cutting Tool. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 2, pp. 314–325. DOI: [10.1007/s10891-019-01935-5](https://doi.org/10.1007/s10891-019-01935-5).
  22. Yaresko S.I., Mikheev P.A., Kakovkina N.G. Guarantee of uniformity of laser radiation intensity through the beam cross section in the process of pulsed heat treatment with the help of unstable resonator. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2000, no. 6, pp. 19–25.

## Optimal scheme of laser hardening of a tool wedge tip

© 2021

**Sergey I. Yaresko**\*<sup>1,2,3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering),  
Head of the Laboratory of Laser-Induced Processes,  
professor of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”  
**Sergey N. Balakirov**<sup>1</sup>, engineer

<sup>1</sup>Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara (Russia)

<sup>2</sup>Samara State Technical University, Samara (Russia)

\*E-mail: [yarsi54@gmail.com](mailto:yarsi54@gmail.com)

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5299-886X>

**Abstract:** Laser heat treatment is one of the effective methods to improve the operational characteristics of metal-cutting tools. In the practice of laser hardening, there are several methods to select treatment mode: experimental, calculated, and according to reference data. The finite element method is promising for estimating the treatment zone parameters, and its application is the most in-demand for calculating the temperature field of a geometrically complex tool. When organizing the hardening process, the selection and setting of processing modes for the cutting wedge tip are the most difficult. In this regard, the solution for the multifactorial problem of optimizing the hardening scheme of an area near the tool tip is relevant when designing and automating the process of blade tool laser hardening. Using the finite element method in the ANSYS Workbench software, the authors carried out the numerical experiments to optimize the laser hardening scheme of the tool cutting wedge tip on the example of an instrument with a wedge angle equal to 60°. The paper consi-

ders three variants of the hardening scheme. The first variant is the implementation of multiple processing of an area adjacent to the tool tip. The second one consists of alternate movement of laser treatment spots along the cutting edges within the tool tip area. According to the third variant, the treatment spots were sequentially located along the bisector of an angle at the tool tip. The study showed that, according to the maximum depth criterion, an optimal hardening scheme is a scheme, which consists of alternate movement of laser treatment spots along the cutting edges in the tool tip area. In this case, the hardening zone characteristics are ensured that exceed similar values describing the hardening zone for other laser treatment options for the tool cutting wedge tip.

**Keywords:** laser hardening; modeling; finite element method; cutter tip; laser treatment; laser impingement point; laser treatment spot.

**For citation:** Yaresko S.I., Balakirov S.N. Optimal scheme of laser hardening of a tool wedge tip. *Frontier Materials & Technologies*, 2021, no. 4, pp. 98–106. DOI: 10.18323/2782-4039-2021-4-98-106.