

УДК 621.9.048.7

*Дин Кай Цзянь*

канд. техн. наук, профессор

Технологический университет Китая

Китайская Народная Республика

DOI 10.21661/r-561425

**ИМИТАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА КРОМОК  
РАЗЪЕМА ДЕТАЛЕЙ ФОРМОВЫХ КОМПЛЕКТОВ  
ПРИ ЛАЗЕРНОМ ТЕРМОУПРОЧНЕНИИ**

*Аннотация:* в статье описывается разработка имитационной модели нагрева кромок разъема деталей формовых комплектов для литья стеклотары при лазерном термоупрочнении. Проведена экспериментальная проверка математической модели.

*Ключевые слова:* лазерное термоупрочнение, кромка, математическая модель.

В настоящее время подавляющее большинство стекольных заводов, занимающихся литьем стеклопосуды, используют формовые комплекты из специального серого чугуна (ферритного, низколегированного, пластинчато-вермикулярного) как наиболее оптимального материала по теплофизическим характеристикам и характеру взаимодействия с расплавленной стекломассой.

В процессе производства стеклотары детали формового комплекта соприкасаются со стекломассой, имеющей температуру 970–1200°C, работают круг-

лосуточно в циклическом режиме открытия-закрытия, соударяясь с периодичностью 4–8 с в зависимости от типа стеклоформирующей машинолинии. Низкий ресурс деталей формокомплекта позволяет снимать порядка 250–300 тыс. бутылок с одного формовочного комплекта, что не удовлетворяет потребностям массового производства посуды в непрерывном режиме и является серьезной проблемой для заводов, вынуждающей часто останавливать автоматические линии для замены форм с потерей рабочего времени и снижения объема выпуска продукции. Причинами столь низкого ресурса форм является выгорание углерода в чугунах и его выкрашивание под воздействием высоких температур, абразивный и ударный износ, что в свою очередь приводит к постепенному разрушению рабочей поверхности форм формокомплекта. Поэтому увеличение ресурса работы формовых комплектов для литья стеклотары, от которого напрямую зависит объем выпуска, является актуальной задачей.

Анализ применяемых методов повышения стойкости чугунных деталей машин показал, что лазерное термоупрочнение (ЛТУ) непрерывным излучением кромок разъема деталей формовых комплектов для литья стеклотары является наиболее приемлемым, перспективным и действенным методом повышения их стойкости в условиях современного производства. На первом этапе был проведен анализ стойкости и характера износа чугунных деталей формовых комплектов. Было установлено, что наиболее подвержены износу формирующие поверхности, рабочие кромки и соприкасающиеся поверхности разъема – замка сцепления деталей формокомплектов (рис. 1).

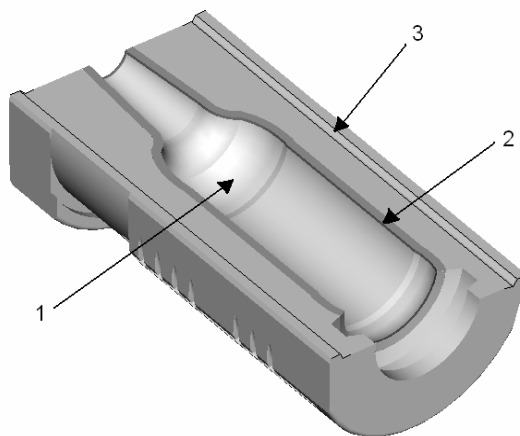


Рис. 1. Чистовая полуформа (0,5 л): 1 – формирующая поверхность;  
2 – кромка рабочая; 3 – замок сцепления

Наибольшему износу подвержены кромки разъема и торцевые кромки. Поэтому для увеличения общей стойкости формовых комплектов достаточно повысить стойкость их кромок.

На основе анализа работ по ЛТУ и из условий обеспечения высоких триботехнических свойств уточнены требования к основным показателям качества, которые предъявляются к рабочим кромкам чугунных деталей формокомплектов: твердость 55–65 HRC или 624–953 HV, которая соответствует мартенситу; толщина (глубина) мартенситной зоны более 0,25 мм; отсутствие трещин в зоне упрочнения; отсутствие оплавления поверхности кромок.

Следующим этапом была разработка имитационной математической модели, которая позволила бы рассчитать температурное поле зоны упрочнения. По характеру распределения температуры в зоне упрочнения и диаграмме железо-углерод определяется получаемая структура чугуна и соответственно присущие ей триботехнические свойства.

Для реализации математической модели были исследованы особенности и характер излучения, создаваемого многоканальным CO<sub>2</sub>-лазером, системой

транспортировки и фокусировки излучения (СТФИ), используемых для термического упрочнения, а также исследовано положение луча относительно кромки разъема деталей формокомплектов.

Было установлено, что многоканальный CO<sub>2</sub>-лазер МТЛ-2М с компоновкой трубок излучателя в виде шестигранника обеспечивает более равномерное (рис. 2), по сравнению с однолучевыми, распределение интенсивности излучения. Однако данное излучение имеет недостаток – разницу в получаемой мощности и продолжительности воздействия на материал подложки при перемещении луча в разных направлениях.

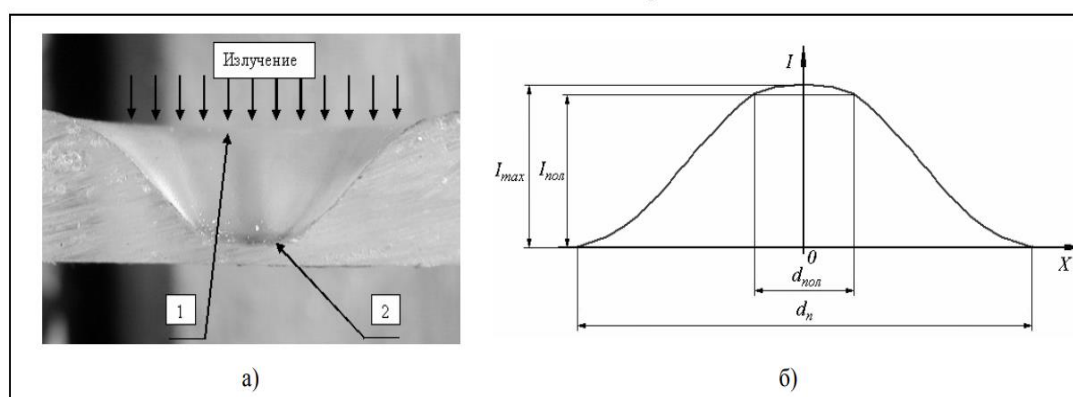


Рис. 2. Отпечаток пятна излучения лазера МТЛ-2 на оргстекле в сечении, за фокусом на расстоянии 60 мм, длиннофокусной линзы  $f = 1240$  мм (а):

1 – диаметр пятна излучения; 2- полочка; распределение интенсивности излучения пучка в декартовой системе координат (б):  $I$  – интенсивность

излучения;  $d_{пол}$  – диаметр полочки;  $d_{п}$  – диаметр пятна

Полученное распределение интенсивности излучения в пучке определяет физико-химические процессы, протекающие в материале при лазерном облучении.

В результате исследования положения пятна излучения (отношение диаметра к «полочке» составляет  $3 \leq B/B_1 \leq 5$ , что показано на рис. 2) относительно

упрочняемой кромки разъема с углом  $80 - 115^\circ$  получена зависимость для определения интервала смещения  $\delta$  (рис. 3), выраженная через диаметр пятна излучения:

$$0,123 \cdot d_{\text{п}} < \delta \leq 0,177 \cdot d_{\text{п}}, \quad (1)$$

что соответствует интервалу смещения по интенсивности:

$$0,77 \cdot I_{\text{max}} \leq I_{\delta} < 0,91 \cdot I_{\text{max}}, \quad (2)$$

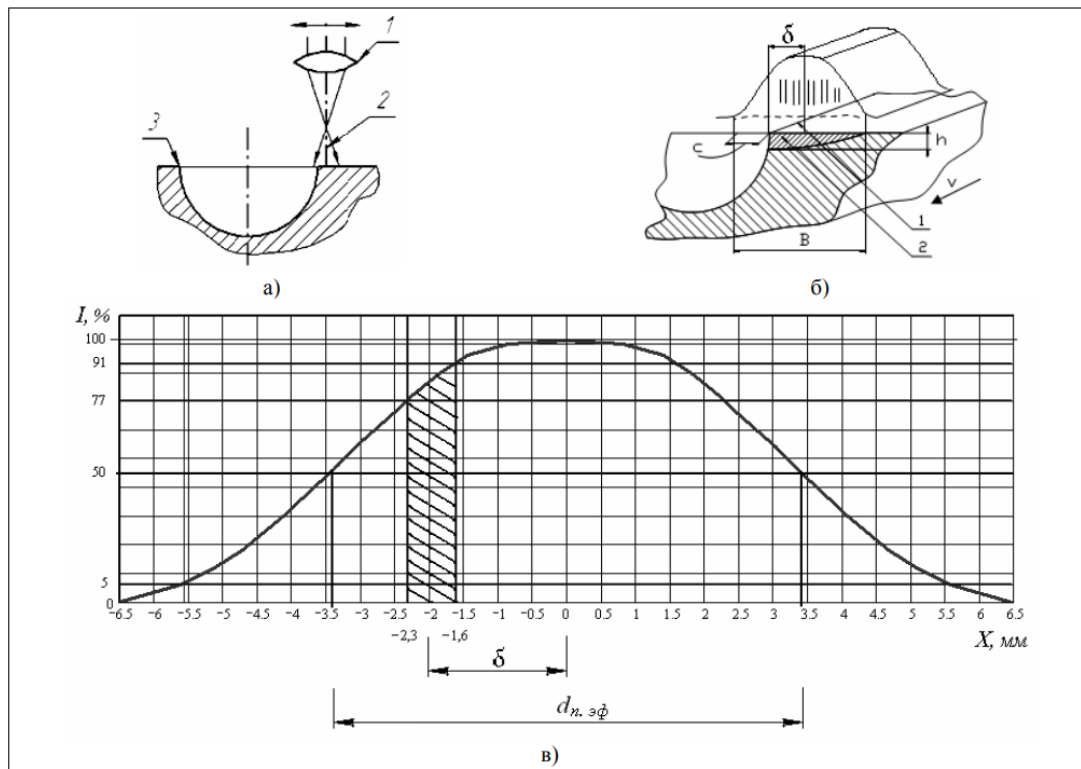


Рис. 3. Схемы смещения лазерного луча относительно кромок: а – (1 – линза; 2 – лазерный луч; 3 – упрочняемая кромка); б – (1 – упрочняемая кромка; 2 – зона упрочнения; с – смещение края луча относительно кромки;  $\delta$  – смещение центра луча относительно кромки; h – глубина упрочнения; v – скорость перемещения полуформы; B – ширина пучка (диаметр); в – (качественное распределение интенсивности в пятне излучения лазера за фокусом на расстоянии 60 мм;  $d_{\text{п зф}}$  – эффективный диаметр пятна)

Данные интервалы обеспечивают сочетание максимальной глубины упрочнения, непосредственно у самой кромки, с минимальными потерями излучения из-за смещения луча лазера относительно облучаемой поверхности.

Моделирование основывалось на решении трехмерной нестационарной задачи теплопроводности в САЕ-комплексе CosmosWorks. Расчет тепловых процессов при лазерной термической обработке мощным распределенным непрерывным источником производился единичными импульсами, не учитывая движения источника. Время нагрева определялось из условия теплонасыщения при прохождении луча своего диаметра [1].

Для реализации имитационной математической модели был разработан алгоритм моделирования процесса нагрева при ЛТУ кромок разъема деталей формовых комплектов.

1. Построение геометрической модели объекта лазерного термоупрочнения в CAD-комплексе SolidWorks (кромки детали размером  $0,02 \times 0,015 \times 0,015$  м).

2. Определение параметров моделирования на основе экспериментальных исследований:

- распределения плотности мощности в луче CO<sub>2</sub>-лазера МТЛ-2М после прохождения СТФИ (расстояние за фокусом 90 мм,  $d_n = 13$  мм,  $f = 1240$  мм);
- положения луча относительно кромки ( $\delta = 2$  мм, рис. 3).

3. Выделение из пятна излучения зон, каждой из которых соответствует своя плотность мощности лазерного излучения (диаметр  $d_n = 13$  мм, 16 зон).

4. Определение мощности лазерного излучения  $P$ , которая на каждом режиме подбиралась так, чтобы максимальная температура материала в пятне

нагрева составила  $T \approx 1100\text{--}1^\circ\text{C}$ . Это обусловлено обеспечением узкого температурного интервала обработки  $1000\text{--}1150^\circ\text{C}$  для протекания полноты фазовых превращений в чугунах и недопущения оплавления поверхности.

5. Решение нестационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов (МКЭ) на выбранных скоростных режимах (время воздействия распределенного лазерного источника соответствовало времени прохождения пятна излучения своего эффективного диаметра). Отображение результатов расчета в виде эпюр и графиков (рис. 4).

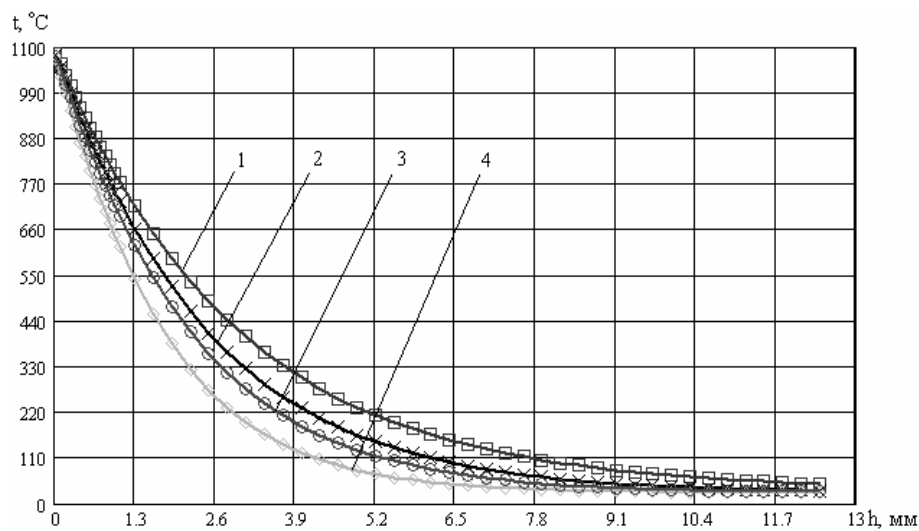


Рис. 4. Зависимость распределения температуры от расстояния до упрочняемой кромки, полученной в результате моделирования ( $d_{\text{п}}=13\text{ мм}$ ):

$$1 - v = 3\text{ мм/с}, P = 591\text{ Вт};$$

$$2 - v = 6\text{ мм/с}, P = 712\text{ Вт};$$

$$3 - v = 10\text{ мм/с}, P = 789\text{ Вт};$$

$$4 - v = 17\text{ мм/с}, P = 957\text{ Вт}$$

Начальные условия задавались, как

$$T_0 = (x, y, z, 0), \quad (3)$$

где  $x, y, z$  – координаты,  $T_0$  – начальная температура, К.

Время воздействия распределенного лазерного источника  $t_{п.эф}$  соответствовало времени прохождения пятна излучения своего эффективного диаметра. Расчетные исследования проводились на четырех скоростных режимах. Каждому режиму соответствовало свое время прохождения эффективного диаметра пятна излучения:  $v = 3 \text{ мм/с} - t_{п.эф} = 2,3 \text{ с}$ ,  $v = 6 \text{ мм/с} - t_{п.эф} = 1 \text{ с}$ ,  $v = 10 \text{ мм/с} - t_{п.эф} = 0,7 \text{ с}$ ,  $v = 17 \text{ мм/с} - t_{п.эф} = 0,4 \text{ с}$ , и при  $d_{п} = 13 \text{ мм}$ ,  $\delta = 2 \text{ мм}$ . В расчетной модели теплофизические характеристики материала зависели от температуры.

При расчете температурных полей зоны упрочнения на этапе нагрева применяли граничные условия 2-го рода:

$$q_0 = -\lambda \partial T(x, y, z) / \partial n, \quad (4)$$

где  $n$ -нормаль к поверхности в точке с координатами  $x, y, z$ ;  $q_0$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность исследуемого материала, Вт/(мК).

При вычислении температуры МКЭ решалась система дифференциальных уравнений, записанных в форме:

$$[H]\{T\} + [c] \frac{\partial}{\partial \tau} \{T\} = \{F\}, \quad (5)$$

где  $[H]$  – глобальная матрица теплопроводности;  $[c]$  – глобальная матрица теплоёмкости;  $\{F\}$  – глобальный вектор тепловой нагрузки.

Анализ результатов моделирования показал, что с увеличением скорости обработки при лазерном термоупрочнении (тепловом воздействии) глубина распространения тепла или зона термовлияния уменьшается. При этом ширина зоны термовлияния практически не изменяется. Температура непосредственно у кромки



на четырех режимах падает с увеличением скорости обработки незначительно:  $v = 3 \text{ мм/с} - 1087^\circ\text{C}$ ,  $v = 6 \text{ мм/с} - 1082^\circ\text{C}$ ,  $v = 10 \text{ мм/с} - 1078^\circ\text{C}$ ,  $v = 17 \text{ мм/с} - 1069^\circ\text{C}$ .

Исходя из диаграммы состояния «железо-углерод» (Fe-C), структурные преобразования в чугунах начинаются выше температуры  $727^\circ\text{C}$ . Эта температура определяет границу зоны упрочнения по глубине. Для расчетных режимов глубина  $h$  термоупрочнения равна: при  $v = 3 \text{ мм/с} - h \approx 1,28 \text{ мм}$ ;  $v = 6 \text{ мм/с} - h \approx 1,08 \text{ мм}$ ;  $v = 10 \text{ мм/с} - h \approx 0,95 \text{ мм}$ ;  $v = 17 \text{ мм/с} - h \approx 0,77 \text{ мм}$ .

В итоге было установлено, что наиболее оптимальными режимами лазерного термоупрочнения кромок разреза чугунных деталей формокомплектов, согласно требованиям к основным показателям качества, являются режимы в диапазоне от  $v = 3 \text{ мм/с}$  до  $v = 6 \text{ мм/с}$ .

Для подтверждения и обоснования оптимальных режимов лазерного воздействия была проведена экспериментальная проверка математической модели процесса нагрева при ЛТУ кромок разреза деталей формовых комплектов.

При выполнении экспериментов были выбраны скоростные режимы термоупрочнения  $3 \text{ мм/с}$ ,  $6 \text{ мм/с}$  и  $9 \text{ мм/с}$ , положение лазерного луча относительно кромки  $\delta = 2 \text{ мм}$ , диаметр пятна излучения  $d_{\text{п}} = 13 \text{ мм}$ , обработка проходила за один проход вдоль кромки.

Мощность лазерного излучения  $P$  определялась по результатам моделирования процесса упрочнения с учетом выбранного коэффициента поглощения полимерного покрытия типа МСЦ-510 и уточнялась экспериментально. Критерием оценки максимальной мощности для отдельно взятого скоростного режима является недопущение оплавления упрочняемой поверхности кромки исследуемого образца.

Исследование, на каждом из трех скоростном режиме, выполнено на примере чугунов, являющихся наиболее типичными при изготовлении деталей формовых комплектов для литья стеклотары [2].

Исследование структуры зоны упрочнения экспериментальных образцов осуществляли методом оптической микроскопии на поперечных шлифах [2, 3]. Замеры твердости производили микротвердомером ПМТ-3 от поверхности кромки в глубь материала, на расстоянии 0,07 мм от боковой поверхности шлифа с шагом между замерами  $\approx 0,04$  мм. Микроструктура изучалась по ГОСТ 3443–87 «Отливки из чугуна с определенной формой графита» на микроскопах МИМ-8 и Epihot TME 200. Результат измерения микротвердости зоны упрочнения одного из исследуемых чугунов представлен на рис. 5.

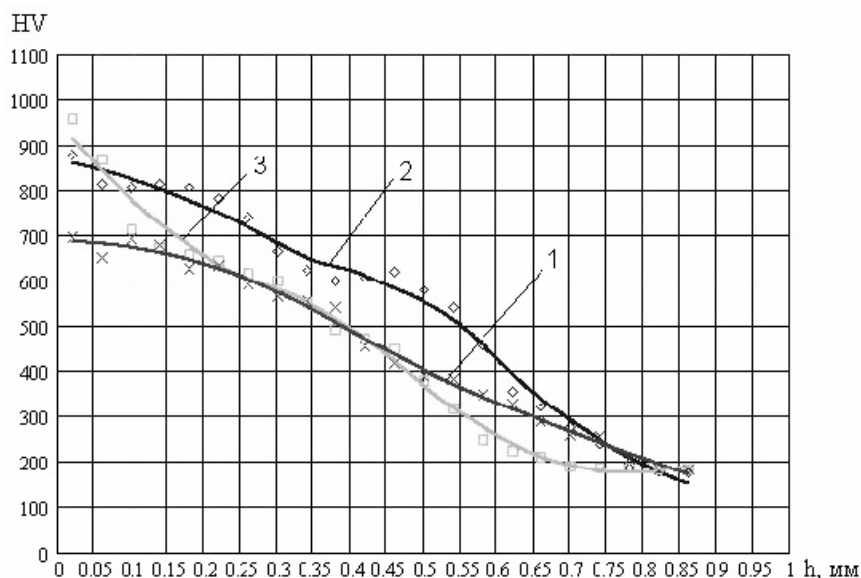


Рис. 5. Распределение твердости HV по толщине упрочненного слоя

на трех режимах:

1 –  $v = 3$  мм/с,  $P = 880$  Вт;

2 –  $v = 6$  мм/с,  $P = 1020$  Вт;

3 –  $v = 9$  мм/с,  $P = 1130$  Вт

Также были проведены эксперименты по измерению температуры в зоне термоупрочнения, заключающиеся в измерении температуры материала на определенном расстоянии от упрочняемой кромки (0,2 мм, 0,6 мм, 0,8 мм, 1,5 мм, 2 мм, 2,5 мм) в момент облучения ее лазерным излучением с помощью чувствительного элемента – термопары и среды LabVIEW. Для проверки согласования результатов численного моделирования с экспериментальными данными было выполнено их сравнение на скоростном режиме 6 мм/с.

В одной системе координат представлены зависимости распределения температуры от расстояния до упрочняемой кромки (рис. 6), полученные в результате наложения распределения твердости HV по толщине упрочненного слоя.

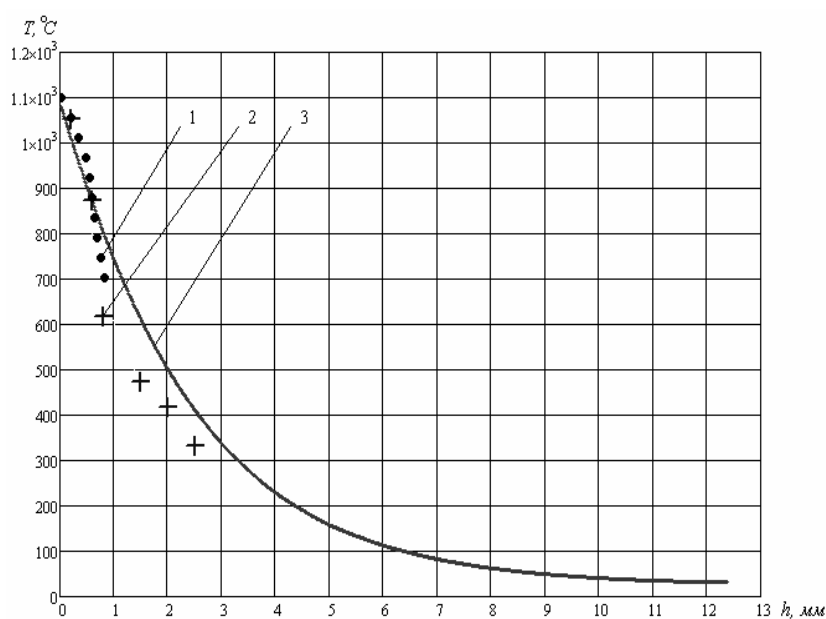


Рис. 6. Зависимости распределения температуры от расстояния до упрочняемой кромки: 1- железо-цементит; 2 – экспериментальная с помощью термопары; 3 – численный анализ в CosmosWorks

Расхождение значений температуры в контролируемом диапазоне (на глубине упрочнения до 0,8 мм), полученных расчетом и экспериментально не превышает

10% при измерении твердости и 14% при термометрировании. Это свидетельствует о корректности разработанной имитационной математической модели.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что режим при  $v = 6$  мм/с,  $P = 1020$ ,  $d_n = 13$  мм, наиболее оптимальный для лазерного термоупрочнения кромок разъема деталей формокомплектов, изготовленных из ферритных, низколегированных, пластинчато-вермикулярных чугунов.

### *Выводы*

1. Разработана имитационная математическая модель нагрева при лазерном термоупрочнении кромок разъема деталей формовых комплектов для литья стеклотары лазерным распределенным источником, реализованная в современном САЕ-комплексе CosmosWorks. Расхождение теоретических значений с экспериментальными не превышает 14%. Выявлено, что наиболее соответствующими основным показателям качества являются режимы с параметрами  $v = 3 - 9$  мм/с,  $P = 591 - 789$  Вт,  $d_n = 13$  мм. Глубина зоны упрочнения для этих режимов составила  $h \approx 1,28 - 0,95$  мм.

2. Анализ особенностей излучения многоканального лазера МТЛ-2М с учетом длиннофокусной СТФИ позволил получить зависимость для определения интервалов смещения  $\delta$  центра пятна излучения относительно упрочняемой кромки с углом  $80-115^\circ$ , которая обеспечивает сочетание максимальной глубины упрочнения у кромки, с минимальными потерями излучения из-за смещения луча относительно облучаемой поверхности.

### ***Список литературы***

1. Григорьянц А.Г. Лазерная техника и технология / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; под ред. А.Г. Григорьянца. – В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.

1. Морозов В.В. Исследование износостойкости упрочненных лазерным излучением кромок деталей формовых комплектов для литья стеклотары / В.В. Морозов, В.И. Югов, А.Н. Шлегель // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №7. – С. 52–56. – EDN IBRTNL

2. Андреев А.А. Технологические особенности получения композиционных наноструктурных покрытий вакуумно-плазменными методами / А.А. Андреев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев // Технология машиностроения. – 2005. – №7. – С. 47–52. – EDN PELAFJ