

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Н.В. Носов¹, А.А. Гусев², И.В. Нырцов¹

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
443011, г. Самара, ул. Ново-Саловая, 221

E-mail: i_nyrtsov@rambler.ru

Рассматривается вопрос оптимизации режимов лазерного упрочнения по величине и знаку остаточных напряжений. На основании проведенных расчетов и имеющихся экспериментальных данных получена номограмма закономерности распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали по минимальному времени обработки.

Ключевые слова: лазерная обработка, упрочнение, метод конечных элементов, остаточные напряжения, номограмма, итучно-калькуляционное время.

Введение

Перспективным методом упрочнения поверхностного слоя деталей является лазерное упрочнение (ЛУ), при котором источником нагрева является лазерное излучение. Эффект упрочнения достигается благодаря локальности и большей интенсивности его воздействия.

Процесс ЛУ проходит в два этапа: нагрев детали до температуры плавления или выше и последующее ускоренное охлаждение ее поверхности. Эффект ЛУ достигается на стадии охлаждения при создании градиентов температуры в поверхностном слое, приводящих к протеканию пластической деформации растяжения. После выравнивания температуры под влиянием нижележащих слоев на поверхности формируются реактивные сжимающие остаточные напряжения.

Лазерное упрочнение принципиально делится на два типа:

- ЛУ без оплавления поверхностного слоя;
- ЛУ с оплавлением поверхностного слоя.

Последний тип обработки на данный момент мало изучен, однако он позволяет добиваться уровня благоприятных сжимающих остаточных напряжений около 1 ГПа в поверхностном слое глубиной порядка 100...200 мкм [1].

В связи с вышеизложенным целью данных исследований является теоретическая оптимизация процесса ЛУ в условиях оплавления вершин микронеровностей поверхности.

Задачи состоят в следующем:

- компьютерное моделирование процесса ЛУ;
- сравнение экспериментальных данных [1] с результатами теоретических расчетов;

Николай Васильевич Носов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Технология машиностроения».

Александр Алексеевич Гусев (к.т.н.), старший научный сотрудник.

Игорь Валериевич Нырцов, инженер.

- разработка методики оптимизации данного процесса по критерию штучно-калькуляционного времени обработки.

Компьютерное моделирование процесса ЛУ

Для изучения процессов, происходящих в образце при ЛУ с превышением температур фазовых переходов и плавления, необходима нелинейная постановка задачи. С целью создания нелинейной модели процесса лазерного упрочнения предполагается использование численных методов, в частности метода конечных элементов. Наиболее функциональным средством исследования методом конечных элементов является программный пакет ANSYS.

Моделирование ЛУ сводится к решению двухмерной нестационарной сопряженной тепло-прочностной задачи. Геометрическая модель ограничена размерами 100×2 мм, что соответствует продольному сечению образцов в исследовании [1].

Лазерное излучение учитывается через параметр плотности мощности (команда Heat Flux), соответствующий постоянной мощности лазера в 1 кВт с учетом эффективного коэффициента поглощения для белой гуаши $A_{эф} = 0,5$.

Интенсивное охлаждение моделируется через конвекцию, коэффициент теплоотдачи при этом составляет $20000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ [1], а температура среды принимается 293 К.

Теплофизические параметры сплава ЭИ698, используемые при расчете:

- теплопроводность ($\lambda = 9,3 \dots 27,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ при $T = 293 \dots 1173 \text{ К}$);
- теплоемкость ($C = 489 \dots 784 \text{ Дж}/\text{К}$ при $T = 250 \dots 1500 \text{ К}$).

Энергетический эффект фазовых переходов при температурах 1190 К (превращение объемно-центрированной кристаллической решетки железа в гранецентрированную), 1660 К (превращение гранецентрированной кристаллической решетки железа в объемно-центрированную) и 1850 К (плавление материала образца) моделируется при помощи энтальпии ($H = 8,2 \cdot 10^9 \text{ Дж}/\text{кг}$, $1,04 \cdot 10^{10} \text{ Дж}/\text{кг}$ и $1,11 \cdot 10^{10} \text{ Дж}/\text{кг}$ соответственно).

Механические параметры сплава ЭИ698, используемые при расчете:

- модуль упругости ($E = 2,02 \cdot 10^{11} \dots 1,52 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ при $T = 273 \dots 1023 \text{ К}$);
- коэффициент линейного расширения ($\alpha = 12,3 \cdot 10^{-6} \dots \alpha = 21,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/\text{К}$ при $T = 330 \dots 1023 \text{ К}$);
- предел текучести ($\sigma_T = 8 \cdot 10^8 \dots 6,8 \cdot 10^8 \text{ Па}$ при $T = 293 \dots 973 \text{ К}$);
- модуль сдвига ($G = 8,42 \cdot 10^{10} \dots 6,33 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ при $T = 293 \dots 973 \text{ К}$);
- коэффициент Пуассона ($\mu = 0,3 = \text{const}$);
- плотность ($\rho = 8320 \text{ кг}/\text{м}^3 = \text{const}$).

Относительное движение источника лазерного излучения и обрабатываемого образца задается выборочным приложением нагрузок к узлам на верхней грани сечения. Размер выборки соответствует диаметру зоны облучения. Приложенные нагрузки сдвигаются вправо с каждым шагом решения на постоянную величину, соответствующую скорости движения. Данный процесс сводится в цикл. Таким образом, имитируется движение зон нагрева и охлаждения по поверхности образца.

В данной работе моделируется лазерная обработка образцов из никелевого сплава ЭИ698 при различных режимах. Эффект упрочнения исследовался на двух режимах:

- 1) скорость движения зоны лазерной обработки $V_1 = 52 \text{ мм}/\text{мин}$; диаметр облучаемого участка $d_1 = 5 \text{ мм}$; плотность мощности $q_m = 5,1 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$;
- 2) скорость движения зоны лазерной обработки $V_2 = 160 \text{ мм}/\text{мин}$; диаметр облучаемого участка $d_2 = 4 \text{ мм}$; плотность мощности $q_m = 7,9 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

На рис. 1 приведены зависимости остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя, полученные на данных режимах обработки. Из приведенных данных видно, что положительный эффект ЛУ (остаточные напряжения сжатия) достигнут только при режиме 1. В то же время обработка по режиму 2 способствует возникновению значительных растягивающих остаточных напряжений.

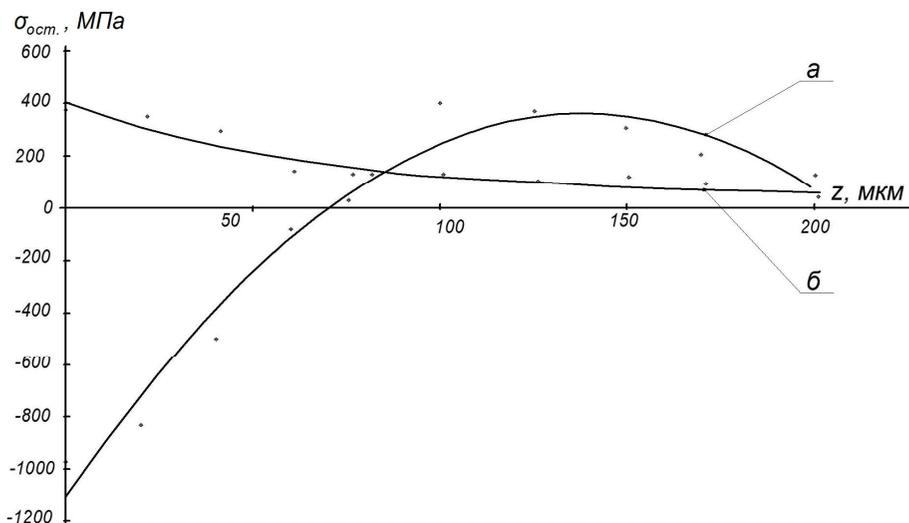


Рис. 1. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины после ЛУ в зоне оплавления для сплава ЭИ698, полученная при компьютерном моделировании: а) режим 1; б) режим 2

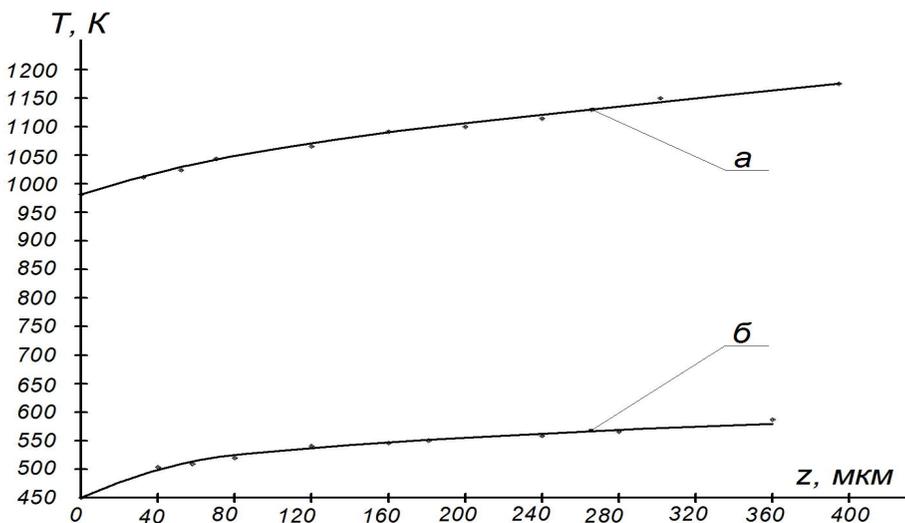


Рис. 2. Распределение температур по глубине на стадии охлаждения: а) режим 1; б) режим 2

На рис. 2 показаны температурные кривые для двух режимов на стадии охлаждения. Из них видно, что градиент температуры на стадии охлаждения при режиме 1 составляет $\partial T / \partial z \sim 600$ K/мм, что превышает установленный в [1] минимальный градиент $\partial T / \partial z \sim 500$ K/мм. В то же время при режиме 2 не создаются условия для формирования благоприятного напряженного состояния – подповерхностный слой недостаточно прогреет вследствие высокой скорости относительного движения луча

лазера, и даже при интенсивном охлаждении минимально необходимая величина градиента температуры по глубине не может быть достигнута.

Сравнение теоретических данных с экспериментальными

В работе использованы исследования по упрочнению образцов из жаропрочного никелевого сплава ЭИ698 с непрерывным лазерным нагревом, проведенные Б.А. Кравченко, С.В. Каюковым и А.А. Гусевым [1]. Образцы шлифовались и покрывались слоем белой гуаши для увеличения коэффициента поглощения.

Источником нагрева служил технологический лазер «Латус-31». Мощность лазера поддерживалась постоянной на уровне 1 кВт. Давление воздуха, охлаждавшего поверхность образцов через систему трубок, также было постоянным и равнялось 650 кПа. Изменяемыми параметрами были скорость относительного движения образца и лазера (от 52 до 160 мм/мин) и диаметр зоны облучения (от 3 до 8,6 мм). Остаточные напряжения на образцах измерялись по методу Н.Н. Давиденкова. Облучению при различных режимах подверглись 16 образцов.

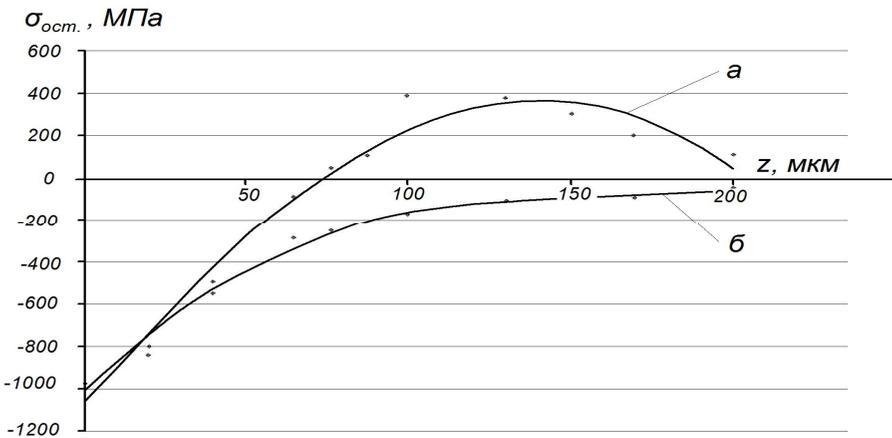


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений $\sigma_{ост.}$ от глубины z после ЛУ образцов из сплава ЭИ698 (режим 1):

а) аналитические данные; б) экспериментальные данные

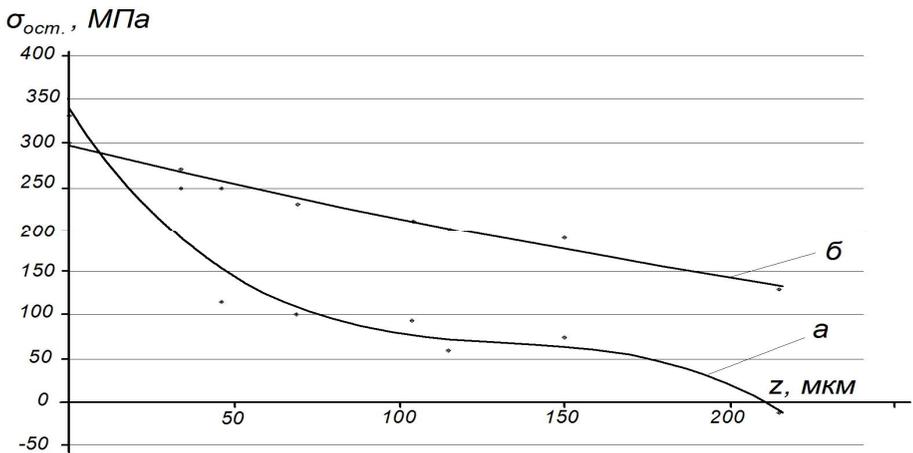


Рис. 4. Зависимость остаточных напряжений $\sigma_{ост.}$ от глубины z после ЛУ образцов из сплава ЭИ698 (режим 2):

а) аналитические данные; б) экспериментальные данные

Сравнение остаточных напряжений, полученных экспериментально и аналитически (по режимам, указанным в п. 1), приведено на рис. 3, 4. Оно показало, что корреляционное соотношение, рассчитанное для экспериментальных и теоретических данных, составило: для режима 1 – $r_1 = 0,967$; для режима 2 – $r_2 = 0,926$.

Уровню значимости 0,01 соответствует критическое значение коэффициента корреляции Пирсона $r = 0,701$, таким образом, $r_1 > r$ и $r_2 > r$, т. е. можно сделать вывод о значимой корреляции между экспериментальными данными и компьютерной моделью.

Оптимизация процесса ЛУ в зоне оплавления

На рис. 5 на основании теоретических исследований остаточных напряжений построена номограмма для определения оптимальных режимов обработки ЛУ сплава ЭИ698. На поле наносились значения остаточных напряжений, а затем проводились линии, соответствующие постоянному уровню остаточных напряжений. Значения, указанные в номограмме, получены теоретически при расчете в пакете ANSYS.

Таким образом, установлено, что при различных режимах обработки возможно образование одинаковых остаточных напряжений. За оптимальные приняты режимы, которые обеспечивают наименьшее значение штучно-калькуляционного времени обработки. Последовательность нахождения режимов обработки показана на примере.

Пример. Необходимо определить режимы лазерного упрочнения участка поверхности изделия площадью $0,04 \text{ м}^2$, при которых остаточные напряжения сжатия достигали величины порядка -1000 МПа .

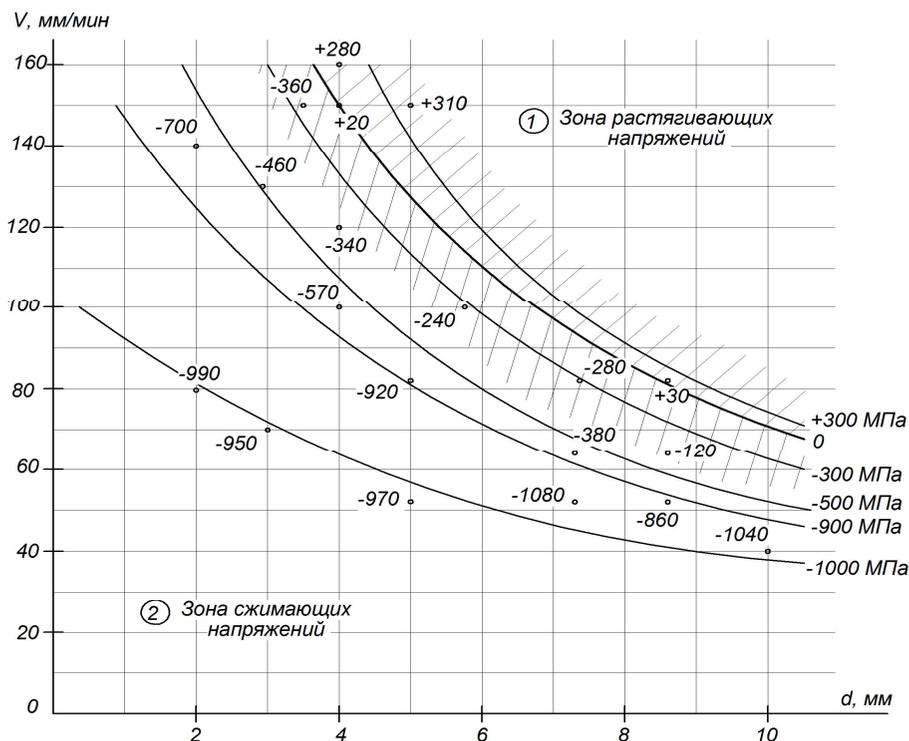


Рис. 5. Номограмма для определения режимов обработки ЛУ сплава ЭИ698

Для этого по номограмме выбираем кривую, соответствующую уровню остаточных напряжений -1000 МПа. Далее рассчитываем штучно-калькуляционное время (форм. 1) для каждого возможного режима, лежащего на данной кривой ($d = 2$ мм, $V = 82$ мм/мин; $d = 4$ мм, $V = 63$ мм/мин и т. д.).

Штучно-калькуляционное время обработки ЛУ прямоугольного участка поверхности заготовки можно определить по формуле

$$t_{шт.-к.} = \frac{LB}{Vdk_n} + \frac{T_{п.-з.}}{N_{зап.}}, \quad (1)$$

где L – рабочий ход; V – скорость поперечного движения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности; B – ширина обрабатываемого участка; d – диаметр зоны облучения; k_n – коэффициент перекрытия; $T_{п.-з.}$ – подготовительно-заключительное время; $N_{зап.}$ – партия запуска.

Принимаем $N_{зап.} = 200$ шт.

$$L = l + y, \quad (2)$$

где l – длина обрабатываемого участка; y – перебег ($y = 6$ мм).

$$L = l + y = 20 + 6 = 26 \text{ мм.}$$

Подготовительно-заключительное время $T_{п.-з.}$ находим по нормативам для станков фрезерной группы: $T_{п.-з.} = 13$ мин (крепление в универсальном приспособлении без делительной головки на вертикально-фрезерном станке IV группы). Результаты расчета $t_{шт.-к.}$ по формуле (1) приведены на графике (рис. 6).

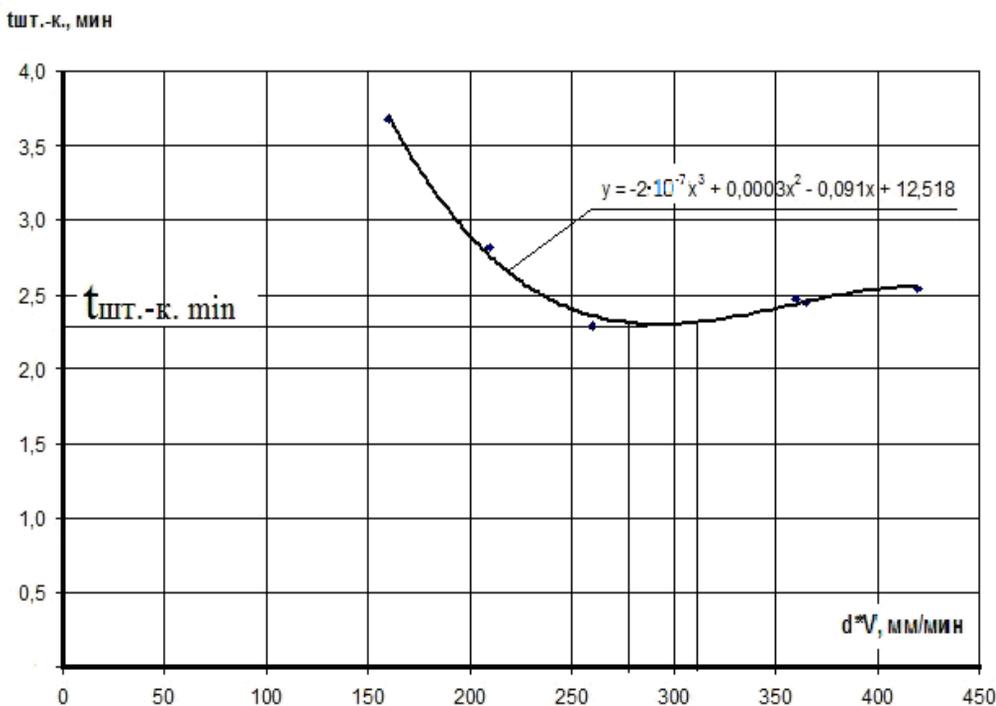


Рис. 6. График зависимости времени обработки ЛУ плоской поверхности 20x20 мм

Как видно из рис. 6, $t_{шт.-к.}$ принимает наименьшее значение $t_{шт.-к.} = 2,3$ мин при $dV \approx 300$ мм²/мин. Таким образом, для достижения уровня остаточных напряжений в поверхностном слое детали -1000 МПа следует выбирать такие значения диаметра зоны облучения d и скорости относительного перемещения V , которые соответствуют условию $dV \approx 300$ мм²/мин.

Выводы

1. Теоретические оценки параметров процесса ЛУ, рассчитанные по разработанной компьютерной модели, соответствуют данным, полученным в эксперименте.
2. Выявленные закономерности и построенная номограмма рекомендуются для разработки режимов лазерного упрочнения деталей, работающих в условиях циклических нагрузок (лопатки, диски турбин газотурбинных двигателей, валы, роторы), а также для снижения уровня вредных растягивающих напряжений в сварных соединениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

10. Кравченко Б.А., Каюков С.В., Гусев А.А. Термопластическое упрочнение жаропрочных никелевых сплавов с использованием лазерного нагрева // Физика и химия обработки материалов. – 1999. – № 6. – С. 17-21.

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2013 г

OPTIMIZATION OF LASER STRENGTHENING PARAMETERS

N.V. Nosov¹, A.A. Gusev², I.V. Nyrtsov¹

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

² Samara Branch of the Lebedev Physical Institute
221, Novo-Sadovaya st., Samara, 443011

The issue of optimization of laser strengthening is considered in this work. Regularities of residual stresses allocation have been achieved by virtue of computing carried out and available experimental data.

Keywords: *laser treatment, strengthening, finite element method, residual stresses, nomogram, time per piece.*

*Nikolay V. Nosov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksandr A. Gusev (Ph.D. (Techn.)), Senior Staff Scientist.
Igor V. Nyrtsov, Engineer.*