

Д. Д. Федотов¹, С. И. Ярьсько²

**РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА–КУКА**

¹ ФГБОУ ВО «СамГТУ»

² Самарский филиал ФГБУН Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН

E-mail: dnsfdtv62@gmail.com, serg19541959@mail.ru

Рассмотрено моделирование процесса лазерной ударной обработки методом конечных элементов с применением модели Джонсона–Кука. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Доказана перспективность использования данной модели для прогнозирования распределения остаточных напряжений в сплавах.

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, метод конечных элементов, модель Джонсона–Кука, пиковое давление, остаточные напряжения

D. D. Fedotov¹, S. I. Yaresko²

**CALCULATION OF RESIDUAL STRESSES IN FINITE ELEMENT MODELING
OF THE LASER SHOCK PEENING PROCESS BASED ON THE JOHNSON-COOK MODEL**

¹Samara State Technical University

²Samara Branch of P. N. Lebedev Physical Institute

The modeling of the laser shock peening process using the finite element method with the Johnson-Cook model is considered. The results of the study are compared with experimental data. The prospects of using this model to predict the distribution of residual stresses in alloys have been proven.

Keywords: laser shock peening, finite element method, Johnson-Cook model, peak pressure, residual stresses

Лазерная ударная обработка (ЛУО) – перспективный метод обработки материалов, позволяющий улучшить механические свойства металлов и сплавов и повысить их устойчивость к износу и коррозии. Исследования в области лазерного ударного упрочнения проводятся уже достаточно давно [1–2], и за это время были получены значительные результаты. Основным достоинством метода ЛУО является достижение высокого уровня сжимающих остаточных напряжений. Значительный интерес к практическому применению процесса ЛУО обуславливает актуальность задачи построения математических моделей, позволяющих прогнозировать уровень наведенных остаточных напряжений в процессе ЛУО и оптимизировать параметры процесса обработки.

С тех пор как анализ результатов конечно-элементного (КЭ) моделирования ЛУО был впервые представлен Брайстедом и Брокманом в 1999 году [3], был опубликован ряд исследований процесса ЛУО с применением программного обеспечения (ПО) ABAQUS [4–5] и ANSYS LS DYNA [6–8]. Применялись различные подходы при моделировании, такие как решение в два этапа, с использованием явного и неявного шагов [4, 8] или решения с привлечением ПО ANSYS AUTODYN [9], где был реализован только явный (динамический) шаг с добавлением коэффициента затухания. Недостатком первого подхода является необходимость выгрузки файлов динамического расчета для последующего их применения при статическом расчете. При моделировании многократного воздействия эта процедура существенно усложняет расчет, однако при анализе однократного воздействия такой подход прекрасно себя зарекомендовал [10, 11]. Недостатком второго подхода, является подбор коэффициента демпфирования.

Как наиболее популярный и проверенный среди методов моделирования ЛУО, в работе использовался стандартный подход к решению задачи в 2 этапа с применением явного и неяв-

ного анализа. Импульс нагружения имеет большую амплитуду и малую длительность, поэтому на первом из этапов (называемого динамическим) расчет выполняется с применением явного решателя (Explicit). В течение данного шага проводится моделирование распространения упругопластической волны в материале. Этап завершается после полной релаксации пластической составляющей импульса давления. Далее в течение второго шага (называемого статическим) применяется неявный решатель (Implicit). На данном этапе происходит релаксация системы, в результате чего материал достигает статического равновесия. Данный решатель позволяет сократить вычислительные затраты при расчете остаточных напряжений. Напряжения в состоянии статического равновесия представляют собой остаточные напряжения.

Цель работы – разработка КЭ модели расчета остаточных напряжений при ЛУО и сравнение полученных результатов моделирования с известными экспериментальными данными.

Метод КЭ – это численный метод, эффективно используемый для решения задач механики деформируемого твердого тела и анализа тепловых процессов, включая задачи ЛУО [4, 11]. Суть метода состоит в разбиении исследуемой области (тела) на конечное число малых элементов, которые могут иметь различную форму. Для каждого элемента строится система уравнений, описывающая его поведение. Затем эти уравнения объединяются в общую систему уравнений, которая решается численно.

Построение модели ЛУО и расчет остаточных напряжений были выполнены в ПО SIMULIA ABAQUS. При этом использовались экспериментальные данные, полученные при ЛУО сплава Ti-6Al-4V [10], и модели назначались свойства, присущие данному материалу.

В процессе решения была создана модель квадратного сечения 20 на 20 мм, которая была разбита на четырехугольные КЭ размером 0.1 мм.

Считая задачу осесимметричной, на границе было задано условие симметричности, что в дальнейшем позволило физически упростить вычислительный процесс.

Помимо конечных элементов при построении модели были использованы бесконечные элементы на границе моделируемого тела. Конечные элементы являются упругопластиче-

скими, полностью нелинейными элементами, которые используются для расчета поля остаточных напряжений. Бесконечные элементы являются только упругими элементами и используются в качестве неотражающих границ при моделировании (рис. 1), их применение позволяет избежать отражения ударной волны от границ моделируемого тела.

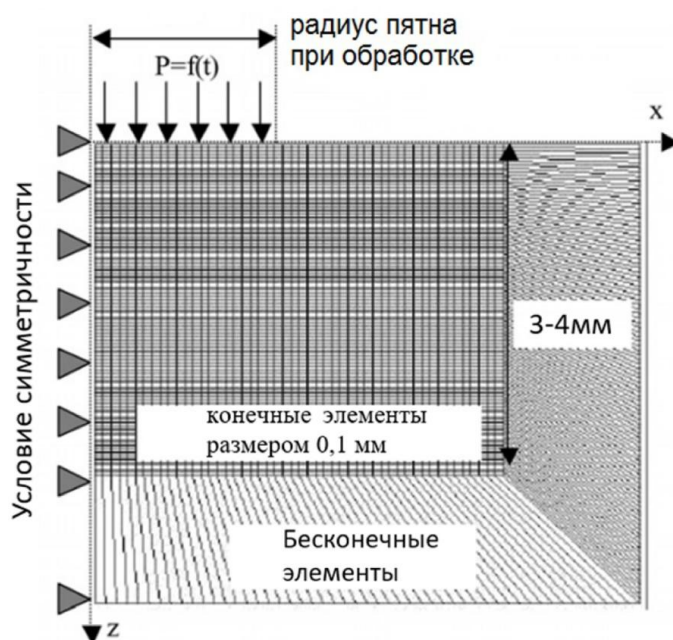


Рис. 1. Схема модели пластины, разбитой на КЭ и закрепленной в пространстве с приложенной нагрузкой

При моделировании ЛУО были использованы режимы обработки, описанные в [10] и представленные в таблице.

Режимы обработки
при лазерном ударном упрочнении

Режимы обработки	Значения
Количество ударов	1
Длительность импульса, нс	10
Пиковое давление, ГПа	5,5
Диаметр пятна, мм	8

При моделировании одиночного удара (импульса) ЛУО данные о нагрузке вводились в ПО ABAQUS с учетом длительности импульса и мощности лазерного излучения. При расчете полагалось, что в зоне удара прикладывается равномерно распределенная нагрузка.

При моделировании было использовано пиковое давление $P_{\max} = 5,5$ ГПа, реализованное в работе [10]. Однако при известных характеристиках лазерного излучения при необходимости вычислить величину пикового давления можно достаточно просто [11]:

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z(\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1})} \sqrt{W(\text{GWcm}^{-2})}, \quad (1)$$

где Z – приведенный акустический импеданс среды, W – плотность мощности лазерного излучения, α – эффективность взаимодействия, принятая равной 0,1 для воды [11].

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2},$$

где Z_1 – акустический импеданс воды, а Z_2 – акустический импеданс металла.

При приложении нагрузки известно несколько способов, чтобы задать амплитуду удара [12]. В нашем случае профиль давления получен на основе экспериментов [10]. Экспе-

риментальная проверка профиля давления, как правило, осуществляется путем проведения испытаний с различной интенсивностью лазерного воздействия и регистрацией, используя методы лазерной интерферометрии, результирующей скорости тыльной поверхности образца, движущейся с высокой скоростью, при помощи системы VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) - системы интерферометра скорости для любого отражателя [13, 14]. При расчете полагалось, что согласно [10] давление растет в течение первых нескольких наносекунд, затем постепенно уменьшается (рис. 2).

При ЛУО скорости деформации в материале превышают величину 10^6с^{-1} . При таких скоростях металлы ведут себя иначе, чем в квазистатических условиях. По мере увеличения скорости деформации металлы обычно демонстрируют небольшое увеличение модуля упругости и предела текучести. Эти изменения при моделировании ЛУО позволяет учесть использование основных положений модели Джонсона–Кука [15], главное преимущество которой заключается в том, что оценка параметров модели, описывающих напряжение течения материала при анализе быстропротекающих процессов, достаточно проста.

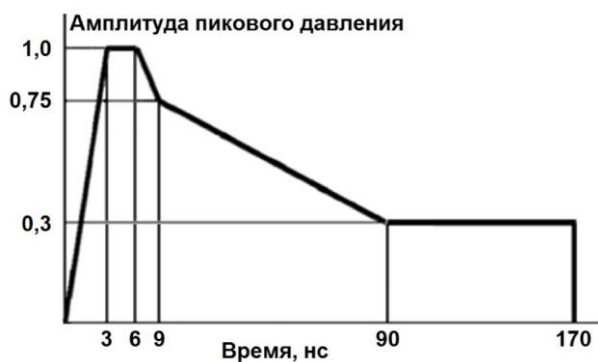


Рис. 2. Зависимость амплитуды давления от длительности импульса при ЛУО

Модель Джонсона–Кука является одной из наиболее часто используемых моделей при исследовании быстропротекающих процессов, например, удара.

Эта модель описывает напряжение, при котором начинается пластическая деформация материала (напряжение течения (σ)), как произведение трех величин: величины деформационного упрочнения, величины, зависящей от скорости деформации, и термической величины (2):

$$\sigma = [A + B \cdot \varepsilon^n] \left[1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 - (T')^m], \quad (2)$$

где

$$T' = \frac{T - T_r}{T - T_m}, \quad (3)$$

при комнатной температуре T_r и температуре плавления T_m величины A ; B , n , C , ε_0 и m определяются экспериментально при испытаниях на разрывном стержне Гопкинсона для скоростей деформации до 10^4с^{-1} ; параметр A – начальный предел текучести при комнатной температуре; параметр n и B учитывает деформационное упрочнение, а параметр m моделирует термическое размягчение; параметр C представляет чувствительность к скорости деформации.

Решение выполнялось за два шага, описанные выше, как наиболее проверенный способ среди известных методов моделирования ЛУО. После окончания расчета данные о распределении ОН по глубине после ЛУО сравнивались с известными из [10] экспериментальными результатами (рис. 3).

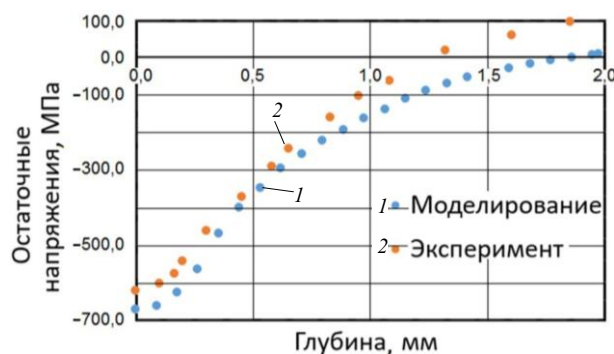


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по глубине образца после однократной ЛУО при $P_{\max}=5,5$ ГПа и длительности импульса 10 нс

Видно (рис. 3), что отличия результатов моделирования от экспериментальных данных менее 10 %, следовательно, возможно прогнозирование результатов ЛУО практически для любых металлов, в том числе и конструкционных сталей, и оптимизация режимов обработки для достижения заданного уровня остаточных напряжений.

В заключении отметим, что КЭ моделирование процесса ЛУО является перспективным направлением исследований и позволяет, как оптимизировать параметры процесса обработки, так и прогнозировать ее результаты. Применение данного подхода способствует повышению качества и надежности изделий, снижению затрат на производство и расширению области применения ЛУО в промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tolga Bozdana A.* On the mechanical surface enhancement techniques in aerospace industry – a review of technology // *Aircr. Eng. Aerospace Technol.* – 2005. – V. 77(4). – PP. 279-292. doi: 10.1108/00022660510606349
2. Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology / Y. Sano, K. Akita, K. Masaki et al. // *J. Laser Micro/Nanoeng.* – 2006. – V. 1(3). – PP. 161-166. doi:10.2961/jlmn.2006.03.0002
3. *Braisted, W.; Brockman, R.* Finite element simulation of laser shock peening // *Int. J. Fatigue.* – 1999. – 21(7). – PP. 719–724. DOI:10.1016/S0142-1123(99)00035-3
4. Material model validation for laser shock peening process simulation / H.K. Amarchinta, R.V. Grandhi, K. Langer, D.S. Stargel / *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.* – 2008. – 17(1). – 015010. DOI:10.1088/0965-0393/17/1/015010
5. *Peyre, P.; Chaieb, I.; Braham, C.* FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels // *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 2007; 15, 205–221. DOI:10.1088/0965-0393/15/3/002
6. Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy / S. Bhamare, G. Ramakrishnan, S.R. Mannava et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2013. – 232. – PP. 464–474. DOI:10.1016/j.surfcoat.2013.06.003
7. *Ballard P.; Fournier J.; Fabbro R.; Frelat J.* Residual Stresses Induced by Laser-Shocks // *J. Phys. IV France* 01. – 1991. – C3-487-C3-494. DOI:10.1051/jp4:1991369
8. An Efficient Reliability-Based Simulation Method for Optimum Laser Peening Treatment / P.J. Hassler, A.S. Malik, K. Langer, et al. // *J. Manuf. Sci. Eng.* – 2016. – 138(11). – 111001. <https://doi.org/10.1115/1.4033604>
9. *Kim R., Suh J., Shin D.* FE Analysis of Laser Shock Peening on STS304 and the Effect of Static Damping on the Solution // *Metals.* – 2021. – 11(10). – P. 1516. DOI:10.3390/met11101516
10. *Nakhodchi S., Poormir M.A., Gharibdsti M.S.* A finite element study of thermal residual stress relaxation in multiple laser shock peened Ti-6Al-4V // *Modares Mechanical Engineering.* – 2018. – 18(3). – PP. 38-44. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-37-en.html>
11. Numerical Simulation and Experimental of Residual Stress Field of SAE1070 Spring Steel Induced by Laser Shock / Bing Han, Changliang Xu, Jialian Shi and Hua Song // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.* – 2013. – 5(20). – PP. 4869-4877. DOI:10.19026/rjaset.5.4334
12. *Crudo C., Enrico Troiani E.* Investigation on Laser Shock Peening Capability by FE Simulation // *Universita' di Bologna. Scuola Di Ingegneria Ed Architettura.* – 2012-2013. – 4.1.3.1-Cod. 8197. 103p.
13. *Peyre P., Scherpereel X., Berthe L., Fabbro R.* Current trends in laser shock processing // *Surface Engineering.* – 1998. – 14(5). – PP. 377-380. <https://doi.org/10.1179/sur.1998.14.5.377>
14. *Barker L. M.* Laser interferometry in shock-wave research // *Experimental Mechanics* 12, 209–215 (1972). <https://doi.org/10.1007/BF02318100>
15. *Johnson, G. R. and Cook, W. H.* A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures // *Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague, Netherlands, 19-21 April 1983, PP.541-547.*