
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ФОРМОВКИ

© 2023 г. Г. Ж. Сахвадзе

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**e-mail: sakhvadze@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 01.06.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

Лазерная ударная формовка — это инновационная технология формования, при которой лазерная ударная волна вызывает изгибную деформацию тонкой пластинки. Естественно, технология лазерной ударной формовки не может увеличивать кривизну пластинок бесконечно и ее возможности имеют свой предел, особенно для толстых пластин. В настоящей статье исследуется максимальная выпуклая изгибная кривизна пластинки, которую можно достичь с помощью технологии лазерной ударной формовки путем последовательного увеличения основных ее характеристик: коэффициента перекрытия лазерных пятен, количества повторяющихся лазерных импульсов и интенсивности плотности мощности лазерного излучения. Возникающий при этом изгибающий момент и изгибная кривизна рассчитываются по средним остаточным напряжениям, полученным методом конечных элементов. Предложенный способ прогнозирования кривизны пластинки может эффективно предсказывать изгибное поведение пластины, что позволяет правильно спланировать процесс формования при лазерной ударной формовке.

Ключевые слова: лазерная ударная формовка, метод конечных элементов, остаточные напряжения, изгиб, кривизна пластинки

DOI: 10.31857/S0235711923050140, **EDN:** XAVAOE

Лазерная ударная формовка (ЛУФ) — это технология холодной обработки материалов и формования без использования штампов. С ростом высоконагруженности элементов машиностроительной, судостроительной и авиакосмической отраслей возрастает спрос на крупномасштабные тонкие пластики сложной формы [1]. Так что, со временем, технология ЛУФ постепенно может стать потенциальным перспективным методом формовки материалов. При ЛУФ под действием плазмы высокого давления тонкая пластинка подвергается высокоскоростной пластической деформации, в результате чего в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения (СОН), а в поперечном сечении — изгибающий момент [2]. Под действием остаточных напряжений и изгибающего момента пластинка испытывает изгибную деформацию (выпуклую или вогнутую). Главная практическая задача ЛУФ — с помощью варьирования этих изгибных деформаций придать пластинке желаемую форму. Отметим, что технология ЛУФ демонстрирует отличную производительность, особенно при формовке тонких пластин [3]. Особенно следует отметить тот факт, что технология ЛУФ, как частный случай технологии лазерного ударного упрочнения (ЛУУ), одновременно с формовкой в приповерхностной области генерирует сжимающие остаточные напряжения (СОН). Это имеет превосходный побочный эффект — посредством СОН улуч-

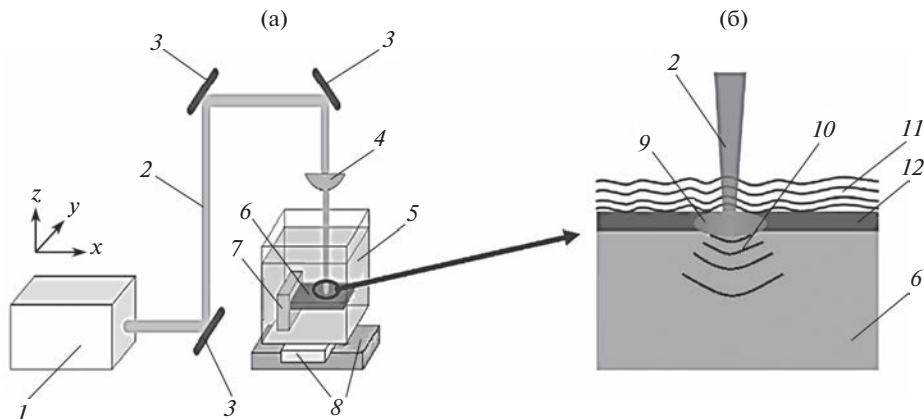


Рис. 1. (а) – принципиальная схема технологии ЛУФ; (б) – увеличенная область воздействия лазерного излучения с пластинкой: 1 – Nd:YAG лазер; 2 – лазерный луч; 3 – отражающие зеркала; 4 – фокусирующая линза; 5 – контейнер с водой; 6 – исследуемая пластинка; 7 – держатель; 8 – прецизионная платформа; 9 – плазма; 10 – ударная волна; 11 – прозрачный слой; 12 – поглощающий слой.

шаются прочностные и эксплуатационные характеристики обрабатываемых пластин [3]. Однако технология ЛУФ имеет свои ограничения по кривизне пластинки, которую она может вызвать с помощью изгибной деформации. Практически отсутствуют исследования по установлению максимальной кривизны пластины, которую можно достичь с помощью технологии ЛУФ. Установление этой величины для разных материалов позволит определить диапазон кривизны, в пределах которой можно будет успешно использовать технологию ЛУФ. Если по техническим требованиям требуется достижение кривизны, больше максимальной, технологию ЛУФ применить нельзя.

Целью настоящей статьи является определение максимальной изгибной кривизны пластинки из алюминиевого сплава В95 толщиной 3 мм, которую можно получить с помощью технологии ЛУФ. Выявляются взаимосвязи между параметрами ЛУФ и изгибной кривизной пластинки. Расчетные значения кривизны сравниваются с известными экспериментальными результатами.

Технология лазерной ударной формовки. ЛУФ, являясь частным случаем классической технологии лазерного ударного упрочнения (ЛУУ), представляет собой метод чисто механического формования листового материала с целью изменения его кривизны с помощью подведения энергии лазерного излучения к поверхности исследуемого материала [4]. На рис. 1а показана принципиальная схема технологии ЛУФ, которая включает в себя контейнер с водой 5, внутри которого расположен консольный узел, состоящий из исследуемой пластинки 6, держателя 7 и прецизионно перемещающейся платформы 8 для точного позиционирования образца вдоль осей x , y и z .

Источником лазерного излучения обычно является наносекундный импульсный твердотельный Nd:YAG лазер 1, где в качестве активной среды используется алюмоиттриевый гранат, легированный ионами неодима Nd. Лазер работает в режиме модуляции добротности на длине волны 1064 нм, удовлетворяя всем необходимым требованиям к лазерному излучению для успешного осуществления технологии ЛУФ [5]. Во время ЛУФ лазерный луч 2 направляется на исследуемую пластинку 6 через ряд отражающих зеркал 3 и фокусирующую линзу 4. На рис. 1б более подробно показана область воздействия лазерного излучения 2 с поверхностью исследуемой пластинки 6. На верхнюю поверхность образца наносится поглощающий слой 12 для поглощения

Таблица 1. Физико-механические свойства алюминиевого сплава В95 [3]

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль Юнга E , ГПа	Коэффициент Пуассона, ν	A	B	n	C
Алюминиевый сплав В95	2800	71	0.33	546	678	0.71	0.0084

падающей лазерной энергии и защиты поверхности пластинки от нежелательных повреждений. Прозрачный слой *11* служит для ограничения гидродинамического расширения лазерно-индуцированной плазмы *9* и повышения пикового давления в ударной волне *10*. В качестве поглощающего слоя можно использовать такие материалы, как черная лента, краска, алюминиевая фольга и графит, а в качестве прозрачного слоя чаще всего выбирают воду [6].

Исследуемый материал и определяющее соотношение. Алюминиевый сплав В95 широко применяется в машиностроительных и аэрокосмических конструкциях благодаря своему легкому весу и высокой прочности. В настоящей статье исследуются особенности применения технологии ЛУФ для алюминиевого сплава В95. Для описания динамической реакции материала на воздействие лазерной ударной волны (в виде высокосортной пластической деформации) используется определяющее соотношение в виде модели Джонсона—Кука [3]. Поскольку технология ЛУФ является процессом холодной обработки материала, то температурной частью в модели Джонсона—Кука пренебрегаем и имеем

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*), \quad (1)$$

где ε — пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^*$ — нормированная скорость пластической деформации; A , B и n — коэффициенты упрочнения; C — константа. Физико-механические свойства и параметры модели Джонсона—Кука для алюминиевого сплава В95 приведены в табл. 1.

Методика расчета изгибной кривизны пластинки. Сначала рассмотрим случай, когда в исследуемой области падает только один импульс. Заметим, что воздействие однократного лазерного импульса с материалом является элементарной единицей воздействия при моделировании технологии ЛУФ. Следовательно, распределение остаточных напряжений по глубине при одиночном лазерном импульсе служит своеобразным ориентиром для оценки характера распределения остаточных напряжений при воздействии многократных лазерных импульсов. Распределение остаточных напряжений σ_i^s по глубине z , вызванных лазерной ударной волной при воздействии однократного лазерного импульса можно определить с помощью уравнения [7]

$$\sigma_i^s = -(A_1 z + A_2) e^{-pz^n} + (kz + b), \quad (2)$$

где A_1 , A_2 , p , n , k , b — коэффициенты, определяемые экспериментально по методике, изложенной в [7]; i — указывает направление остаточных напряжений (по x или y). Как видим, уравнение (2) состоит из двух частей: экспоненциальной части $-(A_1 z + A_2) \exp(-pz^n)$ и линейной части $(kz + b)$. Значение экспоненциальной части приближается к нулю с увеличением z , что характерно для остаточных напряжений, возникающих при ЛУФ [8]. Значение линейной части соответствует остаточным напряжениям, которые возникают при изгибе и растяжении срединной поверхности пластины. Таким образом, игнорируя линейную часть, можно определить остаточные напряжения, соответствующие одиночному лазерному импульсу.

При ЛУФ внутри пластинки возникают градиентные остаточные напряжения, которые способствуют изгибу и растяжению ее срединной поверхности. Силу растяжения можно вычислить следующим образом [9]:

$$F_i = - \int_0^h \sigma_i dz, \quad (3)$$

где σ_i — остаточное напряжение, вызванное лазерной ударной волной, h — толщина тонкой пластинки.

Изгибающий момент равен

$$M_i = - \int_0^h \left(\frac{h}{2} - z \right) \sigma_i dz. \quad (4)$$

Под действием изгибающего момента тонкая пластинка испытывает изгибную деформацию, и соответствующую кривизну можно определить с использованием теории Кирхгофа–Лява [9]

$$\rho_i = \frac{12(M_i - \nu M_j)}{Eh^3}, \quad (5)$$

где i — указывает направление по x ; j — направление по y ; ν — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости материала. Поскольку при ЛУФ профиль распределения ударного давления является осесимметричным, поля возникших остаточных напряжений также являются симметричными, т.е. они одинаковы в направлениях x и y , соответственно, в наших условиях, можно принимать, что $M_i = M_j$.

Механизм выпуклого изгиба. В случае ЛУФ с использованием относительно низкой интенсивности лазерного излучения (например 1.8 ГВт/см²) для формовки толстой пластинки (например, 1.75 мм) из алюминиевого сплава В95, можно получить выпуклый изгиб. Для описания образования выпуклой кривизны разработан так называемый механизм изгиба под градиентом напряжений (МИГН) [10], основные положения которого показаны на рис. 2.

Из рис. 2а видно, что, после того, как на поверхности пластинки во время ЛУФ образуется ударная волна I с пространственно-временным распределением давления $p(r, t)$, облученная область сжимается в направлении толщины z , а соседние области растягиваются по направлению длины x . По мере продолжения процесса сжатия, вокруг облученной области создаются области с растягивающими напряжениями, которые окружают облученную область, создавая там поля сжимающих остаточных напряжений. Как только эквивалентные напряжения достигают предела текучести, зависящего от скорости деформации, возникают пластические деформации (рис. 2б, область 2) — зона пластических деформации ε_p , которая монотонно уменьшается по мере удаления от верхней поверхности [11].

Когда образец толстый или интенсивность лазерного излучения маленькая, вся пластически деформированная область сосредоточена около верхней поверхности. Когда ударная волна перестает вызывать пластическую деформацию, возникает резкий градиент сжимающих остаточных напряжений, который монотонно уменьшается по глубине (рис. 2б, эпюра для σ_x). После этого начинается релаксация сжимающих остаточных напряжений с образованием растягивающих остаточных напряжений в центральной части пластинки (чтобы обеспечивать геометрическую совместимость и самоуравновешенность ОН). Этот процесс схематично показан на рис. 2в. При этом создается изгибающий момент M , который заставляет растягиваться верхним слоям $\varepsilon_x^T > 0$ и сжиматься — нижним. В результате образец отклоняется от лазерного луча с образованием выпуклой кривизны (рис. 2г). После того, как будет достигнуто устой-

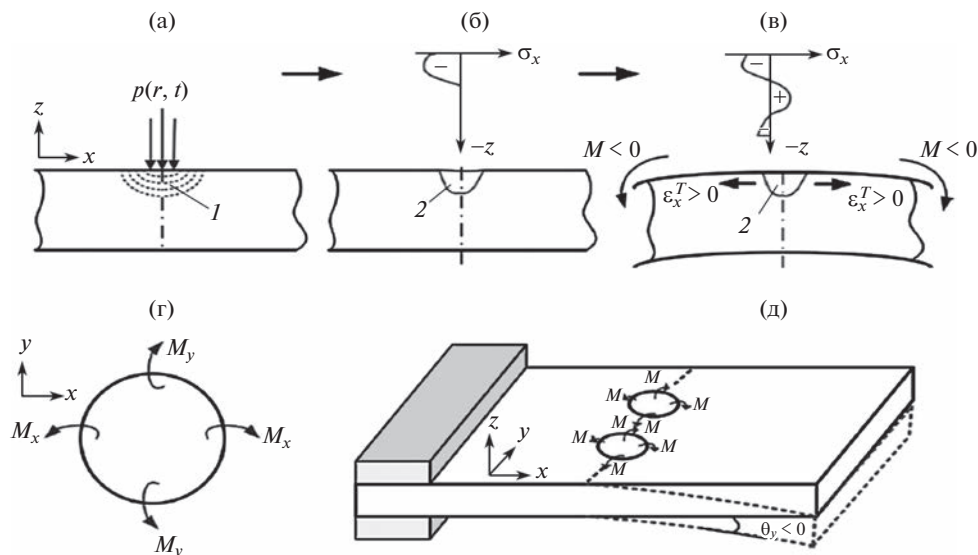


Рис. 2. Механизм изгиба под градиентом напряжений (МИГН), объясняющий образование выпуклого изгиба пластинки при ЛУФ: (а) – воздействие ударной волны I на поверхность пластинки; (б) – формирование градиента остаточных напряжений и зоны пластических деформации $2 \epsilon_p$; (в) – релаксация градиента остаточных напряжений, приводящая к возникновению изгибающих моментов M ; (г) – изгибающие моменты M_x и M_y , возникающие после воздействия лазерного импульса; (д) – образование отрицательного угла изгиба пластинки θ_y .

чивое состояние, как на верхней, так и на нижней поверхности, будут образованы слои со значительными СОН. Таким образом, кроме получения нужной кривизны мы попутно получили приповерхностные области со значительными полями СОН, что существенно повышает их физико-механические характеристики, в частности, усталостную прочность и коррозионную стойкость [12]. Таким образом, получили, что по механизму изгиба под градиентом напряжений (МИГН) возможно образование выпуклого изгиба свободного конца пластинки (рис. 2д). Заметим, что для изотропных материалов, зашпеленных одним концом, как это имеет место при ЛУФ, изгиб происходит вдоль линий сканирования лазерными импульсами.

Величина кривизны пластинки при выпуклом изгибе в основном зависит от градиента сжимающих остаточных напряжений (СОН). Увеличение толщины материала требует увеличения момента для получения того же угла изгиба (рис. 2д, θ_y). Следовательно, при постоянной интенсивности лазерного излучения увеличение толщины материала уменьшает угол изгиба. В предельном случае, когда толщина становится достаточно большой, достигается точка насыщения, на верхней поверхности остается только поле сжимающих остаточных напряжений без какого-либо изгиба $\theta_y = 0$. Заметим, что увеличение количества лазерных импульсов, используемых при обработке ЛУФ, также способствует увеличению угла изгиба [13].

Изменяя один или несколько основных параметров технологии ЛУФ, возможен переход к другому механизму изгиба пластинки – механизму изгиба под напряжением (МИН), который позволяет реализовать режим вогнутого изгиба пластинки по встречному направлению луча [14].

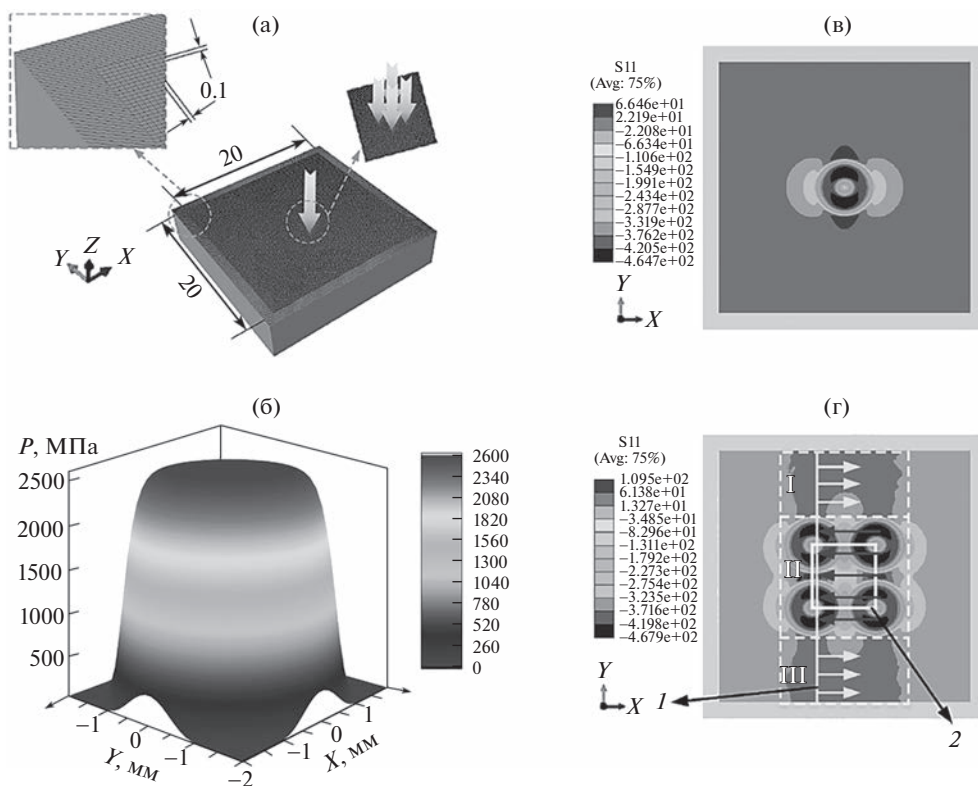


Рис. 3. Конечноеэлементное моделирование технологии ЛУФ, используемое для определения остаточных напряжений, возникающих при воздействии одиночных и многократных лазерных импульсов: (а) — используемая конечноеэлементная сетка; (б) — профиль распределения давления в ударной волне; (в) — распределение остаточных напряжений при воздействии одиночного лазерного импульса; (г) — распределение остаточных напряжений при воздействии многократного лазерного импульса.

Конечноеэлементное моделирование технологии ЛУФ. В конечноеэлементном пакете ANSYS по методике, приведенной в [15], проведено моделирование технологии ЛУФ. На распределение полей остаточных напряжений, возникающих при ЛУФ, определенное влияние оказывают изгибные деформации пластинки. Чтобы исключить влияние изгибных деформаций на поля распределения остаточных напряжений, и изучить только влияние лазерных импульсов, в конечноеэлементной модели предполагается, что модель имеет бесконечную длину как в плоскости x – y , так и по направлению толщины z (рис. 3а). Рассматриваемая область для расчета составляет квадрат с размерами 20×20 мм. В конечноеэлементной модели используются восьмиузловые элементы типа C3D8R. Размер сетки по направлению толщины z одинаков и равен 0.075 мм. На плоскости XY размер сетки составляет 0.1×0.1 мм. Сначала изучается распределение полей остаточных напряжений, возникающих в пластинке при воздействии одиночного лазерного импульса (рис. 3а). Особенности вычисления остаточных напряжений в конечноеэлементном пакете ANSYS при разных типах воздействий приведены в [16–18].

Форма давления в импульсе и картина распределения остаточных напряжений при одиночном импульсе показана на рис. 3б, в. Чтобы изучить влияние количества повторяющихся лазерных импульсов на перераспределение полей остаточных напряже-

ний, возникающих при одиночном импульсе, исследуемая поверхность подвергается многократному воздействию импульсами давления в одном и том же месте. При многократном воздействии лазерными импульсами (рис. 3г) “единичная ячейка” с размерами $2R \times 2R$ (рис. 3г, область 2) равномерно обрабатывается импульсами по S -образной траектории.

Следует отметить, что модель, используемая в настоящей статье, предполагает, что материал — изотропный, хотя это предположение для всех режимов ЛУФ не является верным. В частности, анизотропию материала необходимо учитывать при высоком коэффициенте перекрытия лазерных пятен, при использовании лазерных пятен, близких по размерам к размеру зерна, а также для очень тонких материалов [19]. В конечноэлементном пакете ANSYS сначала вычисляются главные остаточные напряжения $S_{11}(\sigma_x)$ вдоль направления x , а по ним определяется изгибающий момент, возникающий при ЛУФ. Отметим, что в разработанной модели всегда соблюдается самоуравновешенность остаточных напряжений. Например, суммарное остаточное напряжение в поперечном сечении по направлению y равно 0 (рис. 3г). СОН в области воздействия лазерных импульсов (область II — СОН показаны темными стрелками) компенсируется РОН в областях, где нет таких воздействий (области I и III, РОН показаны белыми стрелками I).

Полученные результаты и их анализ. В работе [7] показано, что индуцированные при ЛУФ остаточные напряжения являются главной промежуточной переменной для оценки изгибной кривизны металлических пластин. Отметим, что следует исключить влияние деформации изгиба на распределение остаточных напряжений (иначе точность изгибиной кривизны пластинки будет низкой), необходимость которого обоснована в работах [20–22]. Таким образом, для получения остаточных напряжений путем МКЭ, возникающих при ЛУФ, следует использовать сетку с очень многими (десятками тысяч) конечными элементами, что гарантирует исключение влияния деформации изгиба, а также отражения волн напряжений от поверхностей, на распределение ОН.

На рис. 4 показано сравнение остаточных напряжений по глубине Z при одиночном и многократном импульсных воздействиях, рассчитанных через МКЭ, с экспериментальными данными из [7].

Видно, что численные расчеты хорошо соответствуют экспериментальным данным. Остаточные напряжения сначала увеличиваются с увеличением глубины, а потом уменьшаются и приобретают форму крючка. Изгибающий момент индуцируется сжимающими и растягивавшими остаточными напряжениями, расположенными по глубине пластинки. С увеличением числа повторных ударов поверхностные СОН (при $Z = 0$), а также СОН по глубине постепенно увеличиваются, так что глубина слоя со сжимающими остаточными напряжениями также увеличивается. Заметим, что когда количество повторных ударов превышает 4 (5, 6, 7 — они на рисунке не показаны, чтобы не перегружать его), происходит лишь небольшое увеличение поверхностных и пиковых СОН, а также глубины слоя с СОН.

На рис. 5 показаны профили изгиба пластинки D при воздействии однократных лазерных импульсов с плотностью мощности лазерного излучения 4.24 ГВт/см^2 в зависимости от изменения коэффициентами перекрытия лазерных пятен (η).

Инструкция по достижению насыщенной изгибной кривизны пластинки при ЛУФ. На рис. 6 схематично показана инструкция по достижению требуемой насыщенной изгибной кривизны пластинки при ЛУФ. Обычно перед ЛУФ задается желаемая форма пластинки, которую нужно достичь посредством ЛУФ. Сначала устанавливаются положение и значение максимальной изгибной кривизны пластинки. Затем выбираются определяющее соотношение и виды конечных элементов исходя из свойств материала и толщины деформируемой пластинки. Далее с помощью уравнения (2) определяется возникшие в конечных элементах СОН, далее вычисляется индуцированный при

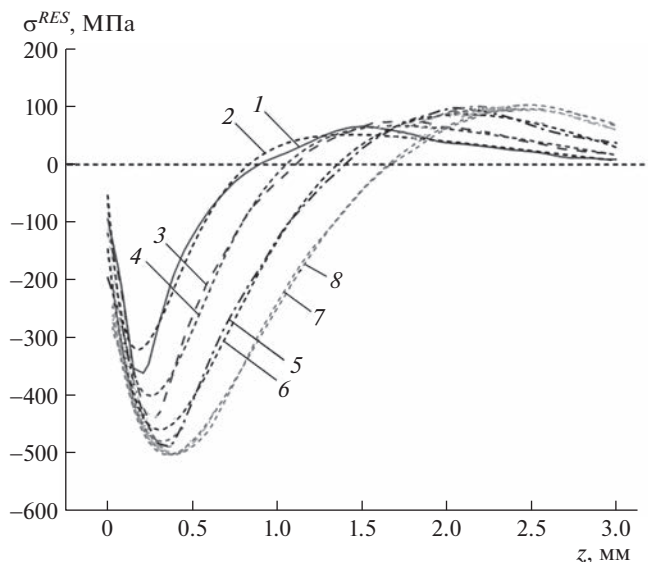


Рис. 4. Распределения остаточных напряжений по глубине пластинки, полученные через МКЭ и из эксперимента [7]: 1 — одиночный импульс; 3 — 2 импульса; 5 — 4 импульса; 7 — 8 импульсов (МКЭ); 2 — одиночный импульс, 4 — 2 импульса; 6 — 4 импульса; 8 — 8 импульсов (эксперимент [7]).

ЛУФ изгибающий момент с помощью уравнения (4), и в конце вычисляется изгибная кривизна по формуле (5).

При ЛУФ (рис. 6) насыщенную изгибную кривизну заданной пластинки можно достичь путем последовательного увеличения коэффициента перекрытия лазерных пятен, количества повторяющихся лазерных импульсов и интенсивности мощности лазерного излучения. Заметим, что среднее индуцированное СОН можно увеличить прежде всего за счет увеличения коэффициента перекрытия лазерных пятен, однако в настоящей статье максимальный коэффициент перекрытия лазерных пятен установлен равным 0.75 (для исключения теплового эффекта от лазерного излучения). СОН также можно улучшить за счет увеличения числа повторных лазерных импульсов, но индуцированные при этом СОН имеют свой предел и быстро достигают своего насыщенного состояния. Чтобы еще больше увеличить изгибную кривизну, можно постепенно увеличивать интенсивность мощности лазерного излучения, но и в этом случае изгибная кривизна также постепенно стремится к своему насыщенному состоянию.

Как показывают проведенные расчеты, величина изгибной кривизны, рассчитанная по среднему индуцированному остаточному напряжению, начинает уменьшаться, когда интенсивность мощности лазерного излучения возрастает до определенного значения. При этом увеличивается глубина индуцированных СОН, что и вызывает уменьшение изгибающего момента, и, соответственно, изгибной кривизны пластинки [23]. Когда изгибная кривизна достигает своего насыщенного значения, далее трудно ее увеличить продолжением увеличения количества повторных ударов и интенсивности мощности лазерного излучения. В этом случае необходимо улучшить формирующую способность технологии ЛУФ с помощью введения в пластинку упругого предварительно напряженного состояния [10] или использовать другие методы для достижения требуемой формы пластинки. Если требуемая изгибная кривизна

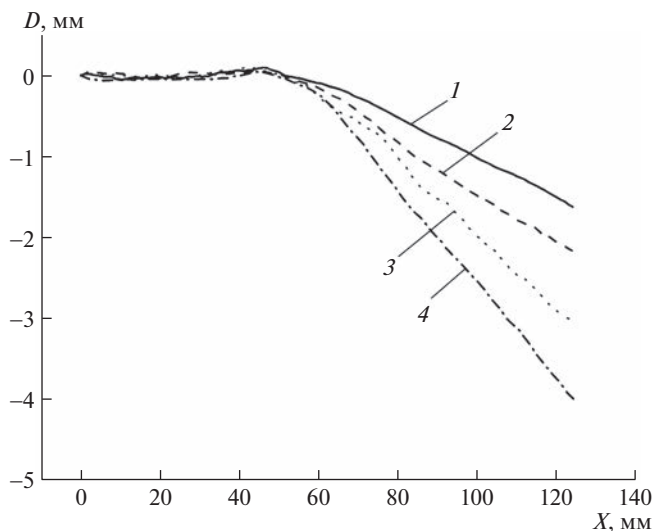


Рис. 5. Профили изгиба пластинки при воздействии однократных лазерных импульсов с плотностью мощности 4.24 ГВт/см^2 при различных коэффициентах перекрытия лазерного излучения: 1 – $\eta = 0$; 2 – $\eta = 0.25$; 3 – $\eta = 0.5$; 4 – $\eta = 0.75$ (МКЭ).

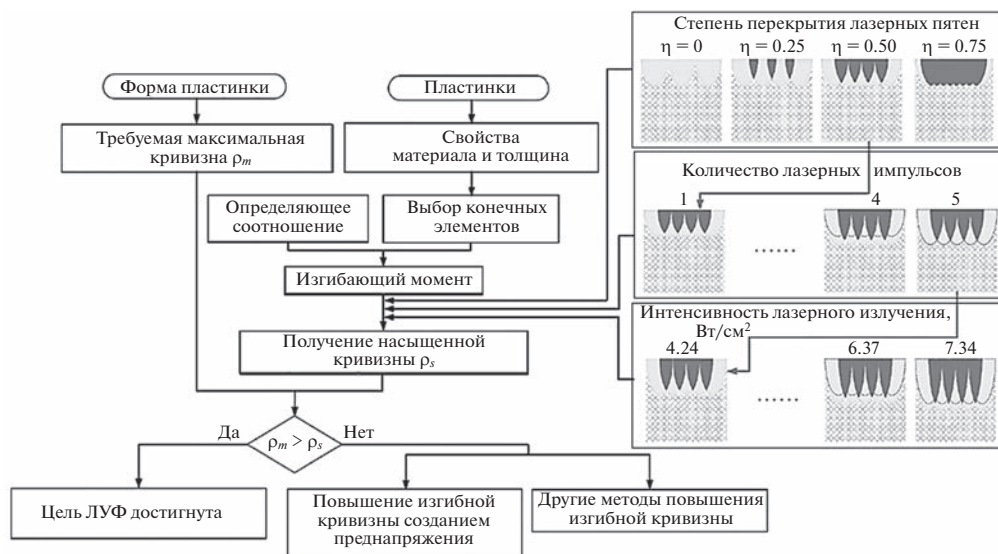


Рис. 6. Инструкция по достижению насыщенной изгибной кривизны пластинки при ЛУФ.

слишком велика, может возникнуть необходимость применения других способов формовки (кроме ЛУФ) для достижения поставленной цели.

Выводы. Лазерное ударное формование (ЛУФ) – это перспективная разновидность технологии холодной штамповки, которая может не только вызывать изгибную де-

формацию тонкой пластики, но и создавать в приповерхностной области мощные поля сжимающих остаточных напряжений, что попутно улучшает ее прочностные и эксплуатационные характеристики. Основные выводы заключаются в следующем: **1.** Проведено конечноэлементное моделирование технологии ЛУФ. Показано, что на эффективность технологии ЛУФ в основном влияют три параметра: коэффициент перекрытия лазерных пятен, количество повторяющихся лазерных импульсов и плотность мощности лазерного излучения. **2.** Исследован механизм изгиба пластинки под градиентом напряжений (МИГН), объясняющий образование выпуклого изгиба пластинки при ЛУФ. Показано, что кроме получения нужной кривизны пластинки при ЛУФ дополнительно получаем приповерхностные области со значительными полями СОН, что существенно повышает их физико-механические характеристики, в частности, усталостную прочность и коррозионную стойкость. **3.** Установлено, что возникшие при ЛУФ средние сжимающие остаточные напряжения можно успешно использовать для вычисления индуцированного изгибающего момента и изгибной кривизны пластинки. Предложенный метод расчета позволяет определить насыщенную изгибную кривизну тонкой пластинки, что обеспечивает оптимальный выбор параметров ЛУФ для достижения нужной изгибной кривизны пластинки и предотвращает получение их больших или меньших значений. **4.** Проведен сравнительный анализ остаточных напряжений по глубине при одиночном и многократном лазерных импульсных воздействиях, рассчитанных через МКЭ, с экспериментальными данными. Показано, что численные расчеты хорошо соответствуют экспериментальным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peng Y.M., Chen J.P., Yang L. *et al.* Study on elongation after shot peen forming for integral panel of large aircraft // *Aeronautical Manuf. Technol.* 2017. № 9. P. 97.
2. Hu Y., Luo M., Yao Z. Increasing the capability of laser peen forming to bend titanium alloy sheets with laser-assisted local heating // *Mater. Des.* 2016. № 90. P. 364.
3. Zhou W.F., Ren X.D., Wang C.C. *et al.* Residual stress induced convex bending in laser peen formed aluminum alloy // *J. Laser Appl.* 2018. № 30. V. 1. P. 012001.
4. Hu Y.X., Yao Z.Q. Fern simulation of residual stresses induced by laser shock with overlapping laser spots // *Acta Metall. Sin.* 2008. № 21. V. 2. P. 125.
5. Behera A., Sahu P.S., Patel S.K. Application of Taguchi methodology for optimization of process parameters in laser bending of Al sheet // *Mater. Today.* 2020. № 26. P. 2323.
6. Hu Y., Xu X. Yao Z. *et al.* Laser peen forming induced two way bending of thin sheet metals and its mechanisms // *J. Appl. Phys.* 2010. № 108. V. 7. P. 073117.
7. Hu Y.X., Han Y.F., Yao Z.Q. *et al.* Three-dimensional numerical simulation and experimental study of sheet metal bending by laser peen forming // *J. Manuf. Sci. Eng.* 2010. № 132. V. 6. P. 061001.
8. Luo M., Hu Y., Hu L. *et al.* Efficient process planning of laser peen forming for complex shaping with distributed eigenmoment // *J. Mater. Process. Technol.* 2020. № 279. P. 116588.
9. Sagisaka Y., Kamiya M., Matsuda M. *et al.* Thin-sheet-metal bending by laser peen forming with femtosecond laser // *J. Mater. Process. Technol.* 2010. № 210. V. 15. P. 2304.
10. Xiao X., Li Y., Sun Y. *et al.* Prediction of peen forming stress and curvature with dynamic response of compressively prestressed target // *J. Mater. Eng. Perform.* 2020. № 29. V. 5. P. 3079.
11. Yang Y., Lu Y. Qiao H. *et al.* The effect of laser shock processing on mechanical properties of an advanced powder material depending on different ablative coatings and confinement medias // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021. № 117. V. 7–8. P. 2377.
12. Sun B., Qiao H., Zhao J. Accurate numerical modeling of residual stress fields induced by laser shock peening // *AIP Adv.* 2018. № 8. V. 9. P. 095203.
13. Zhu R., Zhang Y.K., Sun G.F. *et al.* Numerical simulation of residual stress fields in three-dimensional flattened laser shocking of 2024 Aluminum alloy // *Chin. J. Lasers.* 2017. № 8. P. 133.
14. Hu Y.X., Grandhi R.V. Efficient numerical prediction of residual stress and deformation for large-scale laser shock processing using the eigenstrain methodology // *Surf. Coat. Technol.* 2012. № 206. V. 15. P. 3374.

15. *Hfaiedh N., Peyre P., Song H. et al.* Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy // *Int. J. Fatigue* 2015. № 70. P. 480.
16. *Сахвадзе Г.Ж.* Конечноеэлементное моделирование гибридной аддитивной технологии с использованием лазерно-ударно-волновой обработки // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2023. № 2. С. 94.
<https://doi.org/10.31857/S0235711923020074>
17. *Сахвадзе Г.Ж.* Влияние технологии биомиметической лазерно-ударно-волновой обработки алюминиевых сплавов на их трещиностойкость и остаточную усталостную долговечность // *Вестник машиностроения*. 2022. № 10. С. 58.
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-10-58-65>
18. *Сахвадзе Г.Ж.* Моделирование технологии лазерно-ударно-волновой обработки с помощью искусственной нейронной сети для определения механических свойств титанового сплава BT-6 // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2022. № 2. С. 136.
https://doi.org/10.52261/02346206_2022_2_136
19. *Chen D., Cheng Z.Q., Cunningham P.R. et al.* Fatigue life prediction of 2524-T3 and 7075-T62 thin-sheet aluminium alloy with an initial impact dent under block spectrum loading // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2021. № 44. V. 4. P. 1096.
20. *Vukeli S., Kysar J.W., Yao Y.L.* Crain boundary response of aluminum bicrystal under micro scale laser shock peening // *Int. J. Solids Struct.* 2013. № 46. V. 18–19. P. 3323.
21. *Mylavarapu P., Bhat C., Perla M.K.R. et al.* Identification of critical material thickness for eliminating back reflected shockwaves in laser shock peening – A numerical study // *Opt. Laser Technol.* 2021. № 142. P. 107217.
22. *Hu Y.X., Yao Z.Q.* Overlapping rate effect on laser shock processing of 1045 steel by small spots with Nd:YAG pulsed laser // *Surf. Coat. Technol.* 2008. № 202. V. 8. P. 1517.
23. *Cao Y.P., Feng A.X., Hua G.R.* Influence of interaction parameters on laser shock wave induced dynamic strain on 7050 aluminum alloy surface // *J. Appl. Phys.* 2014. № 116. V. 15. P. 775.