

Л.Ф. Головка, проф., д-р техн. наук, С.А. Лукьяненко, проф., д-р техн. наук, Рахмани Мохсен, асп.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

В.Г. Сороченко, ст. науч. сотр., канд. техн. наук

Институт сверхтвердых материалов НАН Украины

А.И. Мажейка, проф., канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет

Повышение жесткости тонколистовых металлических изделий созданием структурных концентраторов напряжений

Приведены результаты изучения напряженно-деформированного состояния тонких металлических пластин при различных схемах нагружения. Проанализированы пути управления напряженным состоянием локальных участков материалов с помощью лазерного облучения. Освещаются вопросы, касающиеся теплового и структурно-фазового состояния облученных участков, их конфигурации и геометрических параметров, результаты экспериментальных исследований. **напряжение, деформация, лазерный нагрев изотерма, закалка**

Применение тонколистовых металлических материалов для изготовления различных деталей машин обуславливает значительную экономию материальных и энергетических ресурсов, поскольку при этом снижается вес и размеры изделий, трудоемкость и стоимость их изготовления. К таким изделиям можно отнести корпусные детали машин и приборов, антенны космических аппаратов, несущие корпуса различного рода металлорежущих инструментов. Расширение области использования конструкций из тонколистовых материалов сдерживается ограничением по их жесткости.

Жесткость, как известно, это свойство конструкции или ее элементов противостоять внешним нагрузкам с точки зрения их деформации, т.е. изменения формы и размеров. При заданных нагрузках деформации не должны превышать определенные значения, которые являются предельными и устанавливаются в соответствии с требованиями к конструкции.

В настоящее время для повышения жесткости конструкций, изготовленных из тонких металлических материалов, применяют ряд способов. В первую очередь, это конструктивные приемы, которые базируются на связи геометрических параметров изделия и его жесткости. Повысить жесткость конструкции можно, создавая в ней замкнутые полости, изготовлением ребер жесткости, окантовок, утолщений и т.д. Основным недостатком таких способов является увеличение размеров и массы конструкции. Чтобы исключить этот недостаток, такие конструкции изготавливают из специальных композитных материалов, армированных высокомолекулярными частицами или волокнами. Последний способ позволяет в определенной мере решить рассматриваемую проблему. Однако при этом резко возрастает стоимость изделий.

Известно, что лазерный нагрев позволяет создавать в металлических материалах локальные зоны, структура, твердость и напряженное состояние которых будет существенно отличаться от основы. При этом размерами, формой, законом расположения таких зон по поверхности достаточно легко управлять, изменяя траекторию движения луча и

параметры нагрева. Зная закономерности изменения свойств облученных зон и характеристик упругих напряжений, которые возникают в материале реальной конструкции при действии внешних нагрузок, можно существенно влиять на жесткость изделия.

По сути появляется возможность с помощью лазерного облучения создавать в металлических материалах структурные ребра жесткости.

Основной идеей данного направления исследований является создание в металлических материалах на строго определенных участках данной конструкции остаточных напряжений, равных по величине и противоположных по знаку, максимальным упругим напряжениям, которые возникают на этих участках при действии рабочих нагрузок, обусловленных работой детали в составе изделия в процессе эксплуатации. Такой способ влияния на напряженное состояние материала конструкции позволит, в зависимости от приоритета, повысить ее жесткость или величину допустимых нагрузок, снизить материалоемкость изделия и др.

Для реализации этой идеи предлагается целенаправленно создавать в наиболее напряженных участках изделий путем их локального лазерного нагрева, в том числе и с изменением химического состава материала в этих зонах, требуемые остаточные напряжения. Управлять величиной, знаком и характером распределения остаточных напряжений можно, изменяя режимы облучения (импульсный, непрерывный, мощность, время и количество воздействий), топографию размещения зон нагрева, применяя различные материалы, как претерпевающие структурно-фазовые превращения при нагреве, так и нет.

Дополнительные возможности в этом плане предоставляют комбинированные воздействия - нагрев и пластическое деформирование, действия ультразвука и т.д.

Отдельные результаты исследований опубликованы нами ранее [1,2]. Данная работа является логическим продолжением выбранного направления исследований и отражает некоторые результаты, касающиеся возможностей управления напряженным состоянием тонких дисков путем создания температурных полей требуемой конфигурации.

Математическое моделирование напряженно - деформированного состояния диска. Моделирование напряженно-деформированного состояния стального диска при различных условиях нагружения проводилось с использованием программного обеспечения MSC Nastran.

Для этого формировалась сначала двухмерная, затем трехмерная геометрическая модель диска с частью вала, на котором он закреплен (рис.1). При проведении расчетов полагалось, что тонкий диск, изготовленный из хромистой стали (1,3%С, 1%Cr), толщиной 0,5 мм, диаметром 200 мм жестко посажен на вал диаметром 30 мм, к которому приложен крутящий момент M . Модуль упругости E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона μ , плотность материала ρ принимались для углеродистой стали. В качестве граничных, принимались напряжения, соответствующие пределу текучести от стали при растяжении, сжатии и сдвиге.

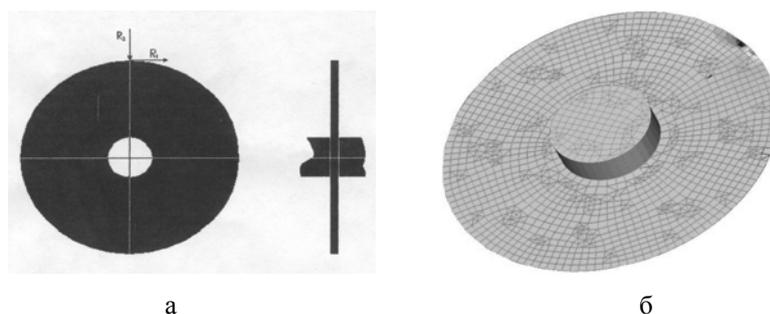


Рисунок 1– Схема расчетной модели диска (а) и разбивки ее на элементы (б)

Для реализации расчета методом конечных элементов были выбраны размеры элементов, исследуемой области, заданы граничные условия и области, к которым они относятся (внутренний диаметр диска), условия нагружения.

В процессе контакта вращающегося диска с обрабатываемым материалом, на него действуют радиальная R1 и тангенциальная R2 реакции. Их соотношение может меняться в достаточно широком диапазоне. Расчеты проводились при различных, характерных соотношениях R1:R2 (табл.1). Направление сил показано на рис.1. Рассчитывались распределения нормальных, тангенциальных, максимальных тангенциальных напряжений и деформаций в различных плоскостях.

Таблица1 – Варианты соотношения расчетных нагрузок

№ вар-нта	R1	R2	№ вар-нта	R1	R2
1	20	10	8	260	220
2	80	50	9	270	320
3	100	110	10	280	420
4	110	130	11	100	420
5	170	140	12	80	200
6	170	170	13	100	250
7	180	210	14	300	100

Экспериментальное оборудование и методики исследования.

Экспериментальные исследования проводились на лазерном технологическом комплексе на базе газоразрядного CO₂ - лазера «Комета-2» (длина волны излучения, $\lambda=10,6\text{мкм}$, мощность излучения, P=1,5кВт, модовый состав пучка, TEM₂₀, диаметр выходного пучка, d =42мм. Излучение фокусировалось линзой, изготовленной из KCl, с фокусным расстоянием F=300мм. Мощность излучения непрерывно контролировалась с помощью специально разработанного проходного измерителя, работающего на ответвлении части излучения (1%) от основного пучка (точность измерения 2%). Для оценки распределения мощности излучения в плоскости фокусирования и определения фактического диаметра пятна в плоскости

фокусирования использовалась методика сканирования поперечного сечения луча диафрагмой, а также анализатор лазерных пучков типа LBA фирмы “ALL GmbH”.

Исследовались углеродистая сталь У10, легированные стали 95X и В2Ф. Образцы толщиной 1 мм обрабатывались лазерным излучением при следующих режимах: диаметр пятна фокусирования, d₀=5мм, мощность излучения, P=1 кВт, скорость обработки, V=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 м/мин.

Облученные образцы пластин разрезались на электроэрозионном станке проволочным электродом в направлении перпендикулярном направлению перемещения лазерного луча (поперек «дорожек») и вдоль их на две равные части. Из одной из половин приготавливался по стандартной методике металлографический шлиф. Выявление микроструктуры зон лазерного нагрева проводилось с использованием 3% спиртового раствора азотной кислоты.

Изучение микроструктуры поверхностных слоев, упрочненных лазерным излучением, проводилось на металлографических микроскопах ММР-2Р, Neofot 23. Металлографические микроскопы были усовершенствованы путем их оснащения цифровой телекамерой, подключенной к компьютеру. Измерение микротвердости зон лазерного нагрева проводилось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 100 г.

Влияние условий нагружения на распределение напряжений в диске. Анализ результатов расчетов показал, что в корпусе круга при приложении внешней нагрузки

(рис.1) формируются различные по величине, знаку и конфигурации распределения напряжения. В области, прилегающей к точке приложения нагрузки, имеют место нормальные сжимающие напряжения, в периферийных – растягивающие (рис.2а, б). Конфигурация их распределения существенно зависит от соотношения радиальной и тангенциальной составляющей нагрузки. При большой радиальной составляющей сжимающие напряжения сосредоточены вдоль радиуса (рис.2а). С увеличением тангенциальной составляющей траектория распределения нормальных сжимающих напряжений выгибается в сторону противоположную направлению вращения круга (рис. 2б). Эта закономерность имеет устойчивый характер. Напряженное состояние круга, а значит и его деформирование, при известных составляющих нагрузки можно прогнозировать.

Задаваясь предельными значениями деформации можно устанавливать критические значения нагрузки. Эти значения нагрузки определяют жесткость диска. Увеличить значение критических нагрузок можно предварительным формированием в материале диска в областях сосредоточения рабочих сжимающих напряжений остаточных напряжений противоположного знака. Такую задачу предлагается решить применением локального лазерного нагрева. При лазерном нагреве в стали в зависимости от химического состава, исходного структурного состояния и условий облучения можно сформировать как сжимающие, так и растягивающие остаточные напряжения [1]. Благодаря локальности процесса можно получить различное их распределение по поверхности диска.

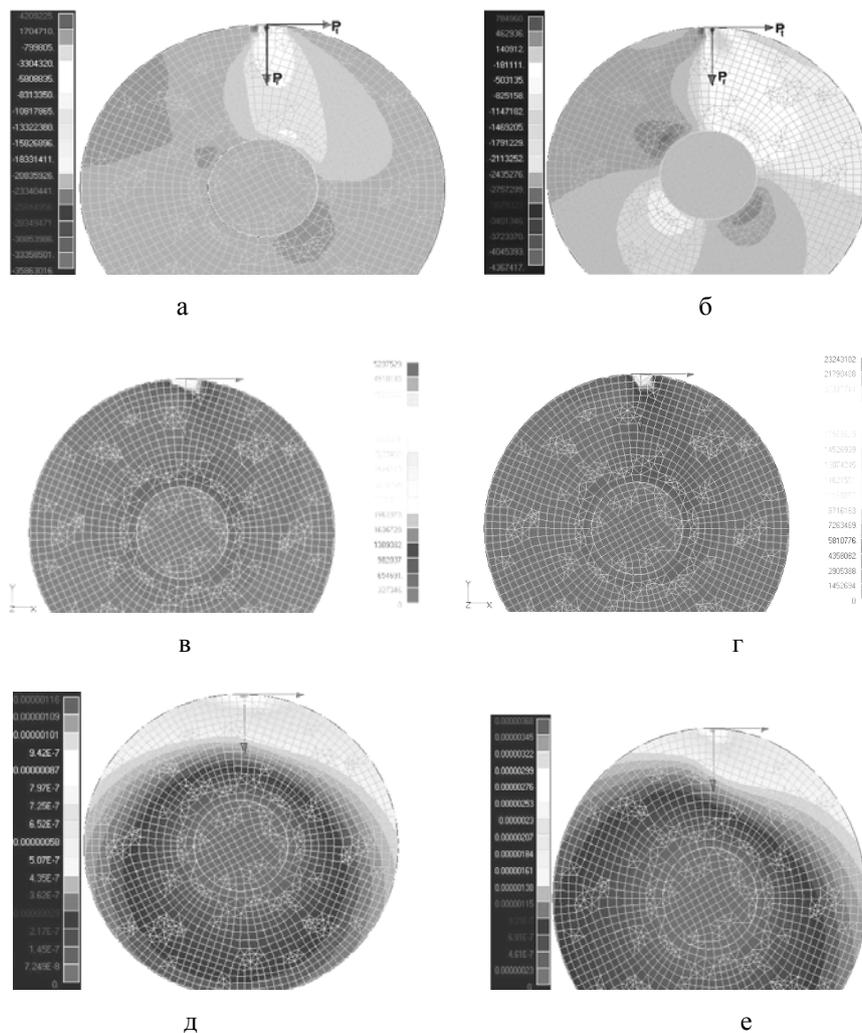


Рисунок 2 – Распределение нормальных (а,б) , тангенциальных (в,г) напряжений и деформаций (д,е) в диске при соотношениях составляющих нагрузки $R_r:R_t$ –50:10Н(а,в,д) ; 80:20Н(б,г,е)

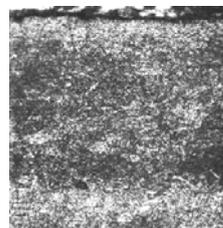
Особенности структурно-фазовых превращений при лазерном нагреве тонких стальных дисков. Структура стали В2Ф в отожженном состоянии представляет собой зернистый перлит и остатки карбидной сетки. На рис. 3а представлена зона нагрева, которая получена в результате лазерного облучения пластины из стали В2Ф толщиной 1 мм при мощности излучения 1 кВт, диаметре пятна фокусирования 4,5 мм, скорости перемещения образца 0,5 м/мин. Эту зону можно разделить на несколько слоев. В первом слое, где температура превышала критическую точку АС_т произошло полное растворение карбидов. Структура этого слоя: мартенсит (рис.3б) и высоколегированный остаточный аустенит. Микротвердость структуры 7000-7500 МПа.

Во втором слое температуры нагрева была более близка к оптимальным температурам закалки для данной стали, а скорости охлаждения – достаточные для образования мартенсита. Карбидная сетка раздроблена, образовались высокодисперсные карбиды. Твердость этого слоя составляет также 7500 МПа. При дальнейшем удалении от поверхности обнаруживается структура неполной закалки, которая включает мартенсит, некоторое количество остаточного аустенита, небольшие включения карбидов. Твердость слоя – 5500-6000 МПа. Переходный слой в отличие от обработки массивных деталей имеет размытые границы. Структура этого слоя: троостит с участками мартенсита.

Как видно из рис.3 общая форма зоны с измененной структурой имеет большую неравномерность по глубине. Это значит, что и напряжения, обусловленные лазерным нагревом и соответствующими структурными превращениями, также будут неравномерными и приведут к деформации диска. В данном случае сжимающие напряжения, обусловленные мартенситными превращениями, будут больше на поверхности диска. Поэтому диск должен принять куполообразную форму, выпуклостью навстречу лучу. Очевидно, что при облучении пластины из нержавеющей аустенитной стали, в которой будут преобладать растягивающие остаточные напряжения, она будет деформироваться в противоположном направлении.



а x75



б x400

Рисунок 3 – Зона лазерного нагрева пластины толщиной 1 мм из стали В2Ф при P=1кВт, d0=4,5 мм, V = 0,5 м/мин (а) и 1,0 м/мин (б)

Чтобы исключить деформацию пластины, можно применить два способа. Первый способ заключается в том, что лазерному облучению подвергаются участки корпуса, лежащие строго друг против друга на противоположных поверхностях (рис.4).

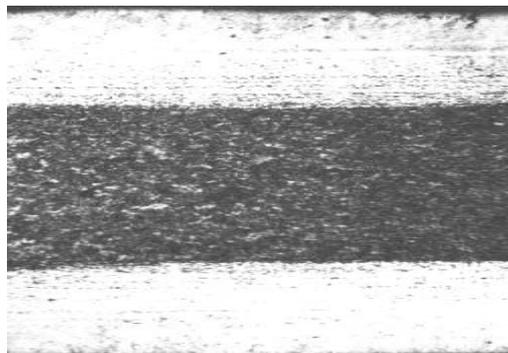


Рисунок 4 – Тонкая пластина из стали (1%С), упрочненная с двух сторон лазерным излучением (P=1кВт, d0=5мм, V=2м/мин)

Для исключения деформации диска в виду локальности процесса лазерного нагрева, его обработку необходимо проводить в заневоленном состоянии (защемленного между двумя матрицами), как это показано на рис.5. Диск устанавливается в матрице приспособления, зажимается второй матрицей с пазами специальной формы, через которые производится лазерный нагрев.

После обработки матрицы с защемленным диском переворачиваются и производится лазерная обработка второй стороны диска. Только после полной обработки освобождается диск. При этом обеспечивается уравнивание напряжений в объеме диска и. таким образом, исключаются деформации.

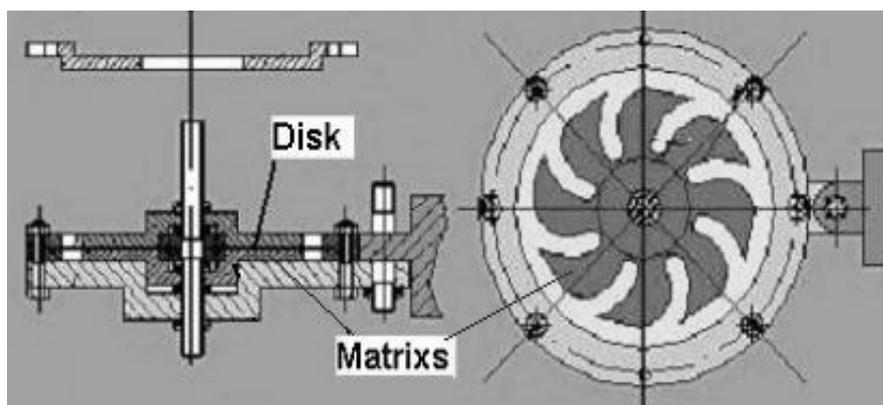


Рисунок 5 – Устройство для двухсторонней лазерной обработки диска в заневоленном состоянии

Возможен и другой способ управления напряженным состоянием корпуса диска. Изменяя параметры облучения, можно сформировать упрочненный слой, толщина которого равна толщине пластины, а форма – близка к прямоугольной. Поскольку границы упрочненного слоя совпадают с изотермами температуры закалки, то необходимо определить условия лазерного облучения, при которых изотермы будут иметь требуемую форму (рис.6).

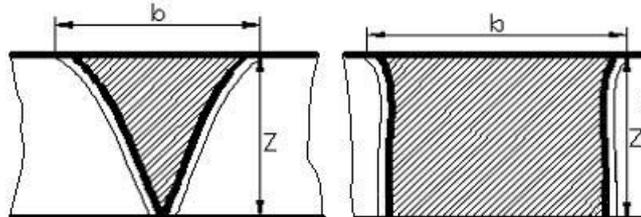


Рисунок 6 – Реальное (а) и желаемое (б) распределение изотерм закалки стали по толщине диска

Чтобы определить эти условия проводилось математическое моделирование тепловых процессов, протекающих в тонкой пластине при нагреве мощным лазерным излучением.

Математическое моделирование теплового состояния тонкой пластины при лазерном нагреве. Лазерный луч с интенсивностью q перемещается по поверхности металлической пластины с размерами L_x, L_y, L_z в направлении оси OY со скоростью V (рис.7).

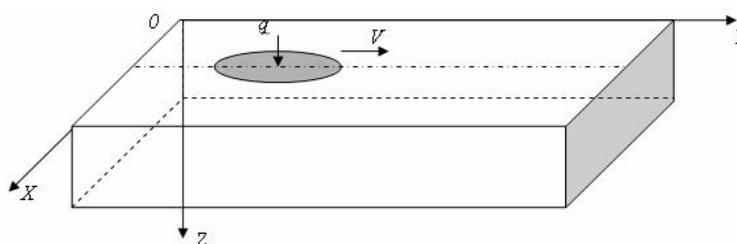


Рисунок 7 – Расчетная схема лазерного нагрева тонкой пластины

Траектория перемещения лазерного луча может быть различной (рис.8а,б), но при этом должна соответствовать наиболее характерным распределениям максимальных упругих нормальных напряжений, представленных на рис.2а,б.

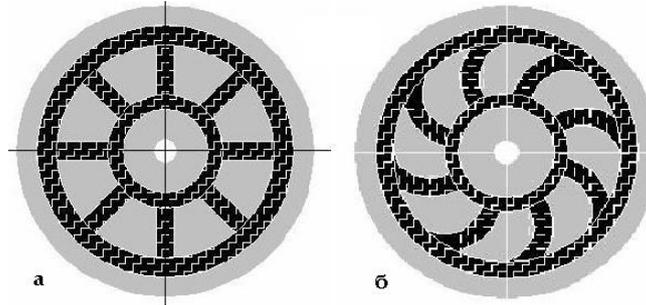


Рисунок 8 – Варианты траекторий перемещения лазерного луча

В качестве модели процесса лазерного нагрева использовалось уравнение теплопроводности (1) с начальными и граничными условиями вида:

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

$$x \in [0, L_x], y \in [0, L_y], z \in [0, L_z], t \in [0, T_k].$$

Начальные условия:

$$U(x, y, z, 0) = U_{нач}$$

Граничные условия - на поверхности в зоне действия луча:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} + q(x, y, t) = 0, \quad q(x, y, t) = q_{max}(x', y') e^{-5 \frac{(x-x_u)^2 + (y-y_u)^2}{r^2}} \quad 4$$

$$x_u = \frac{L_x}{2}; y_u = V \cdot t$$

вне зоны действия луча

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} + \alpha [U(x, y, 0, t) - U_c] = 0$$

на других поверхностях расчетной области:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, L_z, t)}{\partial z} + \alpha [U(x, y, L_z, t) - U_c] = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(0, y, z, t)}{\partial x} + \alpha [U_c - U(0, y, z, t)] = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(L_x, y, z, t)}{\partial x} + \alpha [U(L_x, y, z, t) - U_c] = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(x, 0, z, t)}{\partial y} + \alpha [U_c - U(x, 0, z, t)] = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(x, L_y, z, t)}{\partial y} + \alpha [U(x, L_y, z, t) - U_c] = 0.$$

Для решения этой краевой задачи применялся метод конечных разностей с адаптивной сеткой, которая меняется на каждом временном шаге и уплотняет узлы в зонах больших градиентов искомой функции.

Лазерный луч задавался в виде светового пакета, состоящего из составляющих как равной (рис.9а), так и неравномерной интенсивности (рис.10а).

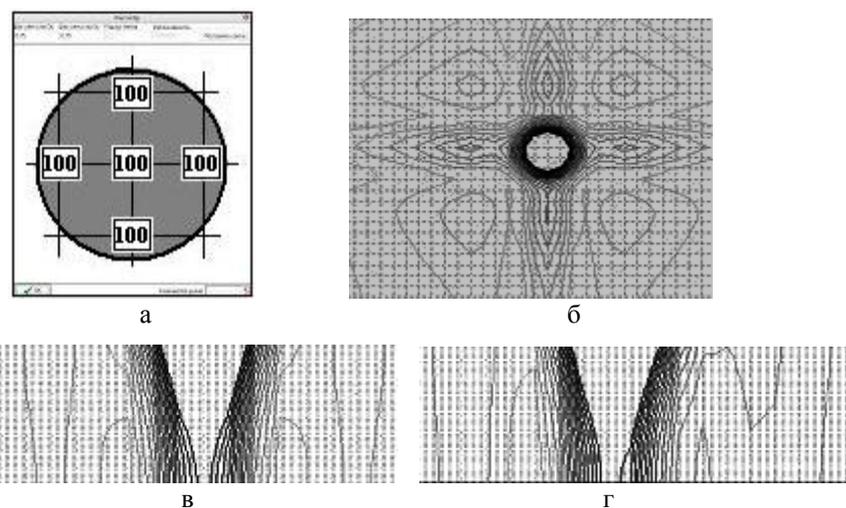


Рисунок 9 – Равномерное распределение мощности лазерного излучения в зоне нагрева (а) и соответствующее распределение температур в плоскостях XOY(б), YOZ (в), XOZ (г)

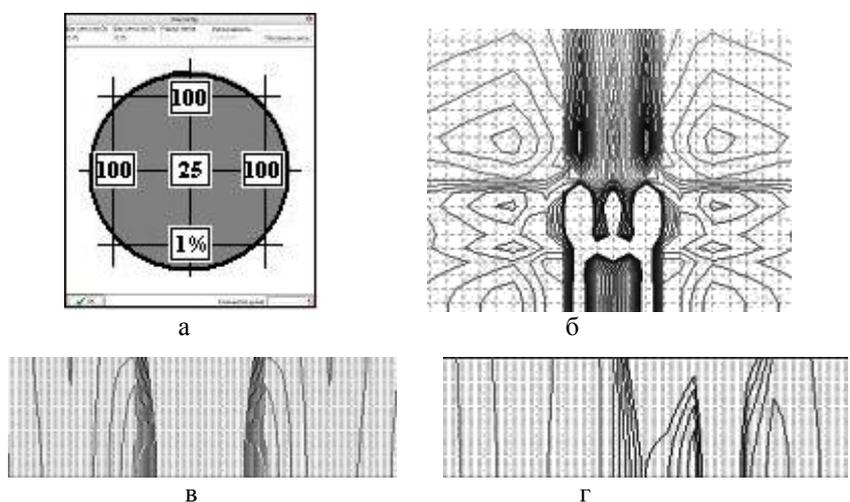


Рисунок 10 – Неравномерное распределение мощности лазерного излучения (а) в зоне нагрева и соответствующее распределение температур в плоскостях XOY(б), XOZ(в), YOZ(г)

Как видно из полученных результатов, при равномерном распределении мощности лазерного излучения (рис.9) изотермы искомой температуры, обуславливающей протекание требуемых структурно-фазовых превращений, ограничивают зону, имеющую неравномерную ширину по толщине пластины, аналогично схем, показанной на рис.3. При одинаковых режимах облучения (скорости обработки, диаметре пятна фокусирования, мощности излучения), но неравномерном распределении мощности лазерного излучения по зоне нагрева (100% интенсивности излучения I во фронте и по бокам пятна фокусирования, 25% - в центре и 1% - в хвостовой части) (рис.10а), изотермы меняют свою конфигурацию и ограничивают область структурно-фазовых превращений практически прямоугольной формы.

Это свидетельствует тому, что управляя распределением мощности лазерного излучения в пятне фокусирования и режимами облучения, можно целенаправленно и эффективно изменять конфигурацию изотерм температурного поля в тонких пластинах.

Заключение. Предложен новый высокоэффективный способ увеличения жесткости тонколистовых металлических конструкций за счет создания с помощью лазерного излучения на участках, где сосредоточены максимальные рабочие упругие напряжения, структурных ребер жесткости.

Моделирование напряженно-деформированного состояния изделий позволяет определить величину, знак и конфигурацию распределения максимальных рабочих упругих напряжений, является способом определения путей повышения их жесткости, эффективности использования материалов.

Лазерное излучение, благодаря высокой локальности воздействия, позволяет, за счет изменения температурного и структурно-фазового состояния отдельных областей материала, управлять величиной, знаком и характером распределения остаточных напряжений и тем самым существенно повышать жесткость металлических конструкций.

Управляя распределением мощности лазерного излучения на облучаемой поверхности можно направленно изменять конфигурацию изотерм, а значит и напряженное состояние тонких пластин.

Примененный при решении тепловой задачи адаптивный алгоритм расположения сетки при одинаковой точности результатов по сравнению с фиксированной сеткой позволяет существенно уменьшить время расчетов, получать результаты с наперед заданной точностью, повысить их точность за счет уплотнения сетки в зонах с большими градиентами температур.

Список литературы

1. Lia Handbook of Laser Materials Processing. 7.5.3. L.F. Golovko et all. Laser Institute of America. Orlando, USA, 2001. – P.249-258 (715p.).
2. Коваленко В.С., Головко Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. К., Техніка, 1991. -192с.
3. Golovko L.F, Kovalenko V.S., Kagljak A.D. et all. Increase of Rigidity of thin Laminas by Creation and Optimum Arrangement of Metallurgical Stress Raisers. International Conference on Laser Technologies in Welding and Materials Processing. Crimea., Katsiveli, May 21-28, 2005.– PP.76-79.

Наведені результати вивчення напружено-деформованого стану тонких металевих пластин при різних схемах навантаження. Проаналізовані шляхи керування напруженим станом локальних ділянок матеріалів за допомогою лазерного опромінення. Висвітлені питання, що стосуються теплового і структурно-фазового стану опромінення ділянок, їх конфігурації і геометричних параметрів, результати експериментальних досліджень.

The results of study of the tensely-deformed state of metallic laminas are resulted at the different charts of ladening. The ways of management by the tense state of local areas of materials are analysed by the laser irradiation. Questions, touching the thermal and structurally-phase state of the radiation-exposed areas their configuration and geometrical parameters, results of experimental researches, are lighted.