

# ТРЕХМЕРНАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАРТ ФИГУРНОГО РАСКРОЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

## THREE-DIMENSIONAL GRAVITY MODEL FOR IMPROVEMENT OF CUTTING CARDS WITHIN THE FEATURES OF LASER TECHNOLOGICAL COMPLEX

**D. Lyalin  
A. Zatonsky**

*Summary.* In this article we described an algorithm for improvement of cutting cards with a three-dimensional gravity model. Technological gaps and cutting depths depending on features of laser technological complex such as laser power, the moving speed of the cutting tool and metal properties such as thickness, density and melting point are investigated. A module for calculating the minimum technological gap provided metal cutting and extortion optimal parameters of laser technological complex is designed. Gap dependencies from laser technological complex parameters are obtained.

**Key words:** nesting of sheet materials, three-dimensional gravity model, technological gap, laser technological complex.

**Лялин Дмитрий Алексеевич**

Аспирант, ФГБОУ ВО Пермский национальный  
исследовательский политехнический университет  
lyalindim@gmail.com

**Затонский Андрей Владимирович**

Д.т.н., профессор, Березниковский филиал ФГБОУ  
ВО Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет  
z Xenon@narod.ru

*Аннотация.* В работе описан алгоритм работы трехмерной гравитационной модели улучшения карт фигурного раскроя листовых материалов. Получены выражения для расчета технологического зазора и глубины разрезания, с учетом особенностей лазерного технологического комплекса, таких как мощность лазерного излучения и скорость перемещения режущего инструмента, и свойств металла, таких как толщина, температура плавления и плотность.

На основе выражений разработан модуль расчета минимального технологического зазора при условии разрезания металла и подбора оптимальных параметров лазерного технологического комплекса. Составлены модели зависимости зазора от параметров лазерного технологического комплекса.

*Ключевые слова:* фигурный раскрой листовых материалов, трехмерная гравитационная модель, технологический зазор, лазерный технологический комплекс.

**Р**аспространенным технологическим процессом в машиностроении является лазерная резка — основная операция заготовительного производства [1–2]. Широкий диапазон толщин и марок разрезаемых материалов, практически любые параметры вырезаемых заготовок позволяют изготовить заготовки различных типоразмеров и геометрической сложности. Лазерную резку металлов можно сравнить с другими методами термической резки — с газопламенной и плазменной. При лазерной резке металл расплавляется лучом лазера. Фокусирование лазерного луча осуществляется линзой, установленной в режущей головке. Резка тонких заготовок (до 2 мм) происходит за счет испарения металла. При резке более толстых заготовок для выдувания расплавленного металла из канала реза туда подается газ под давлением (обычно кислород или азот). Сфокусированное высокоэнергетическое лазерное излучение позволяет получить узкие разрезы с малой зоной термического влияния практически в любых металлах и сплавах, независимо от их теплофизических свойств. Малое термическое влияние обуславливает малое же

механическое воздействие на обрабатываемый материал, а потому деформации (временные — в процессе резки, остаточные — после полного остывания) невелики. Вследствие этого можно осуществлять лазерную резку легкодеформируемых и нежестких заготовок с высокой степенью точности и производительностью.

Качество лазерной резки характеризуется шириной реза, шероховатостью поверхности и отсутствием или наличием грат (затвердевших капель расплава на нижней кромке реза) [3]. Эти показатели зависят от мощности излучения, скорости перемещения лазерного излучателя, физико-химических свойств металла и атмосферы, окружающей зону реза. Исследованию процесса и оптимизации режимов лазерной резки при различных условиях посвящено множество работ, например [4–7]. Высокая плотность мощности лазерного луча может быть достигнута как в импульсном, так и в постоянном режиме. Пиковая мощность импульса при импульсном режиме и средняя мощность при постоянном режиме определяют глубину проникновения

лазерного луча. Высокомощные лазеры, работающие в постоянном режиме лазерного луча, предпочтительны для ровной, высокопроизводительной лазерной резки, и предпочтительны при резке материалов большой толщины. Однако при постоянном режиме лазерной резки удаление расплавленного или испаренного материала не успевает предотвратить передачу тепла в боковые поверхности разреза, из-за чего происходят дополнительный нагрев материала и ухудшение качества резки. Более низкий по энергетическому уровню импульсный режим лазерной резки предпочтителен для точной, высококачественной лазерной резки. Высокомощный короткий импульс лазерного луча обеспечивает эффективный нагрев заготовки с низким средним уровнем мощности, что, в итоге, приводит к снижению скорости обработки, но обеспечивает хорошее удаление расплава/испарения из зоны резания, снижет формирование грата. Как показывают исследования [8], при лазерной резке заготовок с острыми углами лучшее качество реза обеспечивается именно импульсным режимом. При изменении траектории резки сразу по двум координатам происходит перегрев металла в точке перехода, что может вызвать коробление металла, приводящее к браку. Для предотвращения этого предлагается на стадии формирования карты раскроя на острых углах заготовок формировать технологический зазор в форме дуги (рис. 1) с радиусом

$$r_{gap} = b_{cut} + f(\varphi), \tag{1}$$

где  $r_{gap}$  — радиус дуги,  $b_{cut}$  — ширина реза,  $f(\varphi)$  — добавочная функция, возвращающая приращение радиуса дуги в зависимости от угла заготовки, задается оператором лазерного технологического комплекса.

Для составления карт раскроя ранее была разработана двумерная гравитационная модель и ее программная реализация [9] с использованием физического игрового движка. Плоские заготовки помещаются в пространство раскраиваемого листа, затем этот лист встряхивается, поворачивается в воображаемом гравитационном поле, в соответствии с программой моделирования. Заготовки рассматриваются как абсолютно упругие тела в инерциальной системе отсчета. В процессе моделирования («утряски») они соударяются, отскакивают, поворачиваются под действием гравитационных сил и трения с другими заготовками и т.д. Это позволяет достичь более плотного размещения заготовок на листе [10], чем при использовании классических методов построения карт раскроя.

Однако метод двумерного гравитационного моделирования имеет существенный недостаток. Мелкие заготовки должны быть вручную или путем применения других алгоритмов помещены внутрь полостей крупных,

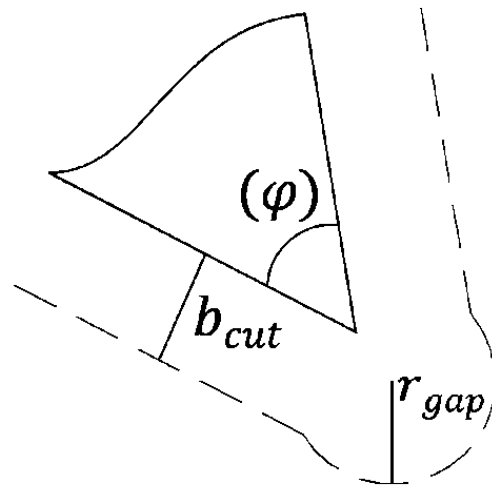


Рисунок 1.  
Формирование технологического зазора для острого угла заготовки.

что повышает качество раскроя. Заготовка не может сама проникнуть во внутреннее отверстие другой заготовки, так как третья координата в пространстве листа отсутствует.

Поэтому представляется разумным превратить плоские заготовки в объемные и организовать их моделирование в трехмерном пространстве. Это даст заготовкам лишние степени свободы, позволит перескакивать одной заготовке через угол другой и даже проникать в полости. В толстом слое утрясаемых тел, как известно, большие «всплывают» вверх, а при снижении интенсивности вибраций «тонут», раздвигают мелкие заготовки, что способствует заполнению полостей. Прототип трехмерной гравитационной модели разработан и описан в работе [11]. Заготовки, составляющие карту раскроя, помещаются на лист с нулевой массой, что позволяет ему самому не подвергаться гравитационному воздействию. Заготовкам придается объем [12], упругость, плотность, коэффициенты трения поверхности и начальный технологический зазор. Задается начальный гравитационный вектор, который в ходе моделирования может менять свое направление. Уточняется критерий качества — коэффициент раскроя, коэффициент делового остатка, коэффициент расхода материала и т.п. Задается программа утряски (вектор вибраций листа, амплитуда, частота, момент поворота гравитационного поля, продолжительность каждой вибрации и т.д.). Выбор утряски может осуществлять пользователь на свое усмотрение, либо она может быть выбрана программно в зависимости от набора заготовок, формы листа и критерия качества. Утряска реализуется при помощи фи-

Таблица 1. Физические свойства металлов для исследования.

Физическая величина, размерность	Значение
Плотность металла $\rho$ , г/мм <sup>3</sup>	0,007856
Удельная теплоемкость металла $c$ , Дж·г <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	0,466
Удельная теплота плавления металла $\lambda$ , Дж/г	275
Температура плавления металла $T_m$ , К	1900

зического движка, производится контроль «зависания» заготовок друг на друге и их стряхивание. По окончании моделирования полученная карта раскроя приводится к плоскому виду.

Одной из перспективных задач при подготовке заготовок к моделированию является автоматический расчет технологического зазора в зависимости от параметров лазерного технологического комплекса и материала. Минимизация рассчитанного зазора, достигаемая с помощью подбора оптимальных параметров ЛТК, также положительно влияет на коэффициенты качества раскроя. Целью исследования является разработка и внедрение в гравитационную модель модуля расчета технологического зазора и оптимизации параметров ЛТК

Начальный технологический зазор в модели рассчитывается на основе исследований, проведенных в работе [5]. В ней для минимальной шероховатости поверхности при полном отсутствии грата проведена оптимизация параметров резки стали толщиной до 25 мм излучением CO<sub>2</sub>-лазера, а также найдены безразмерные параметры, определяющие получение минимальной шероховатости стенок реза. Для этого использовано уравнение баланса энергии лазерной резки стали в виде:

$$AW + W_{ox} = W_m + W_{cond}, \quad (2)$$

где  $A = A(h)$  — интегральный коэффициент поглощения;  $W$  — мощность лазерного излучения, Вт;  $W_{ox}$  — мощность, выделяемая при окислении железа Вт;  $W_m$  — мощность, затрачиваемая на плавление металла в зоне реза, Вт;  $W_{cond}$  — мощность, расходуемая на нагрев металлавне зоны реза, Вт. В развернутом виде уравнение баланса выглядит следующим образом:

$$AW + Vbh\delta_{ox}\Delta H = Vbh\rho(c\Delta T + \lambda) + W_{cond}, \quad (3)$$

где  $V$  — скорость резки, мм/с;  $b$  — ширина реза, мм;  $h$  — толщина листа, мм;  $\rho$  — плотность металла, г/мм<sup>3</sup>;  $c$  — удельная теплоемкость металла при комнатной температуре, Дж·г<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\lambda$  — удельная теплота плавления металла, Дж/г;  $\delta_{ox}$  — доля окисленного железа в удаляемом расплаве;  $\Delta H$  — удельная теплота реакции окисления (отношение энергии реакции окисления  $E_O$  к моляр-

ной массе железа  $M$ ), Дж/г;  $\Delta T$  — разница температуры плавления металла  $T_m$  и температуры окружающей среды  $T_0$ , К.

Интегральный коэффициент поглощения  $A$  и мощность, расходуемая на нагрев металла вне зоны реза  $W_{cond}$  были получены экспериментально в [5]. Доля окисленного железа  $\delta_{ox}$  в удаляемом расплаве рассчитана на основе экспериментов и составляет 30%-36%.

Из уравнения баланса (3) можно получить формулу расчета ширины реза  $b$ :

$$b = \frac{AW - W_{cond}}{Vh\rho(c(T_m - T_0) - \delta_{ox}\frac{E_O}{M} + \lambda)} \quad (4)$$

На основе экспериментальных значений интегрального коэффициента поглощения и мощности, расходуемой на нагрев металлавне зоны реза, с помощью метода наименьших квадратов получены уравнения квадратичной регрессии:

$$W_A(h) = -0.0006h^2 + 0.0231h + 0.5197 \quad (5)$$

$$W_{cond}(h) = 2.9909h^2 + 118.2364h + 159.5455 \quad (6)$$

Уравнения аппроксимируют исходные данные с погрешностью, не превышающей 1%.

При подстановке функций (5) и (6) в формулу (4) получается итоговое выражение, используемое в гравитационной модели для расчета начального технологического зазора

$$b = \frac{W_A(h)W - W_{cond}(h)}{Vh\rho(c(T_m - T_0) - \delta_{ox}\frac{E_O}{M} + \lambda)} \quad (7)$$

Для исследования зависимости ширины реза от основных параметров толщина листа  $h$ , скорости реза  $V$  и мощности излучения  $W$  использовались физические свойства стали [13], которые представлены в таблице 1.

В результате исследования получено множество данных, некоторые графики представлены на рисунках 2–4.

Как видно из графиков при увеличении мощности и толщины листа ширина реза возрастает, а при увеличении скорости убывает, что соответствует действитель-

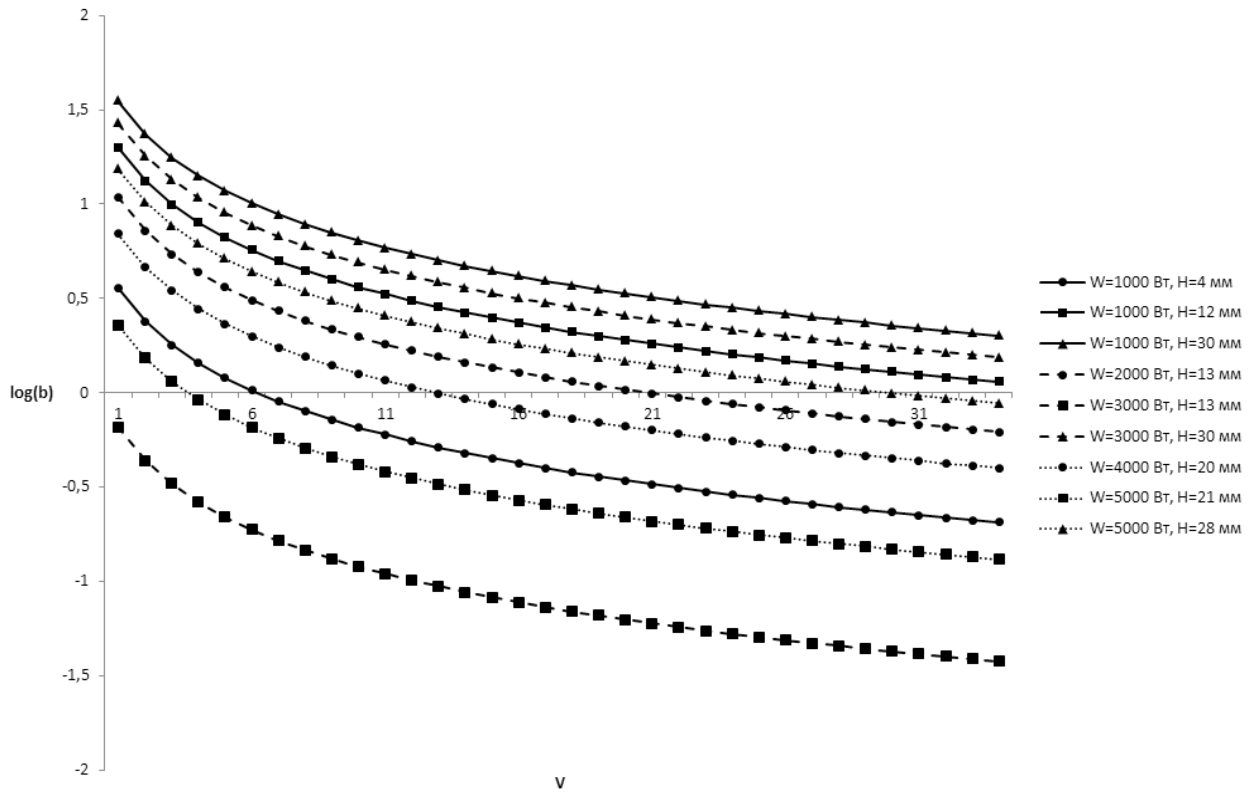


Рисунок 2. Зависимость логарифма ширины реза  $b$  от скорости реза  $V$ , при различных мощностях излучения  $W$  и толщинах листа  $h$ .

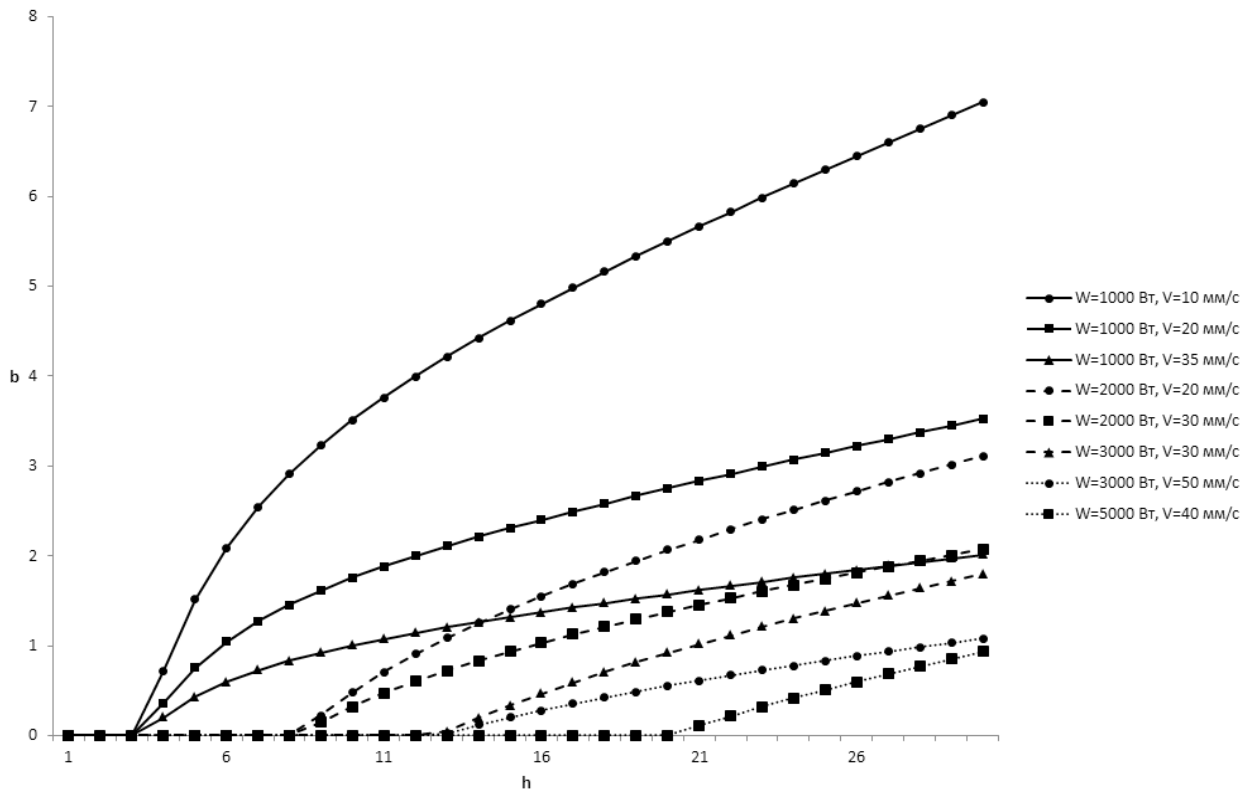


Рисунок 3. Зависимость ширины реза  $b$  от толщины листа  $h$ , при различных скоростях реза  $V$  мощности излучения  $W$ .

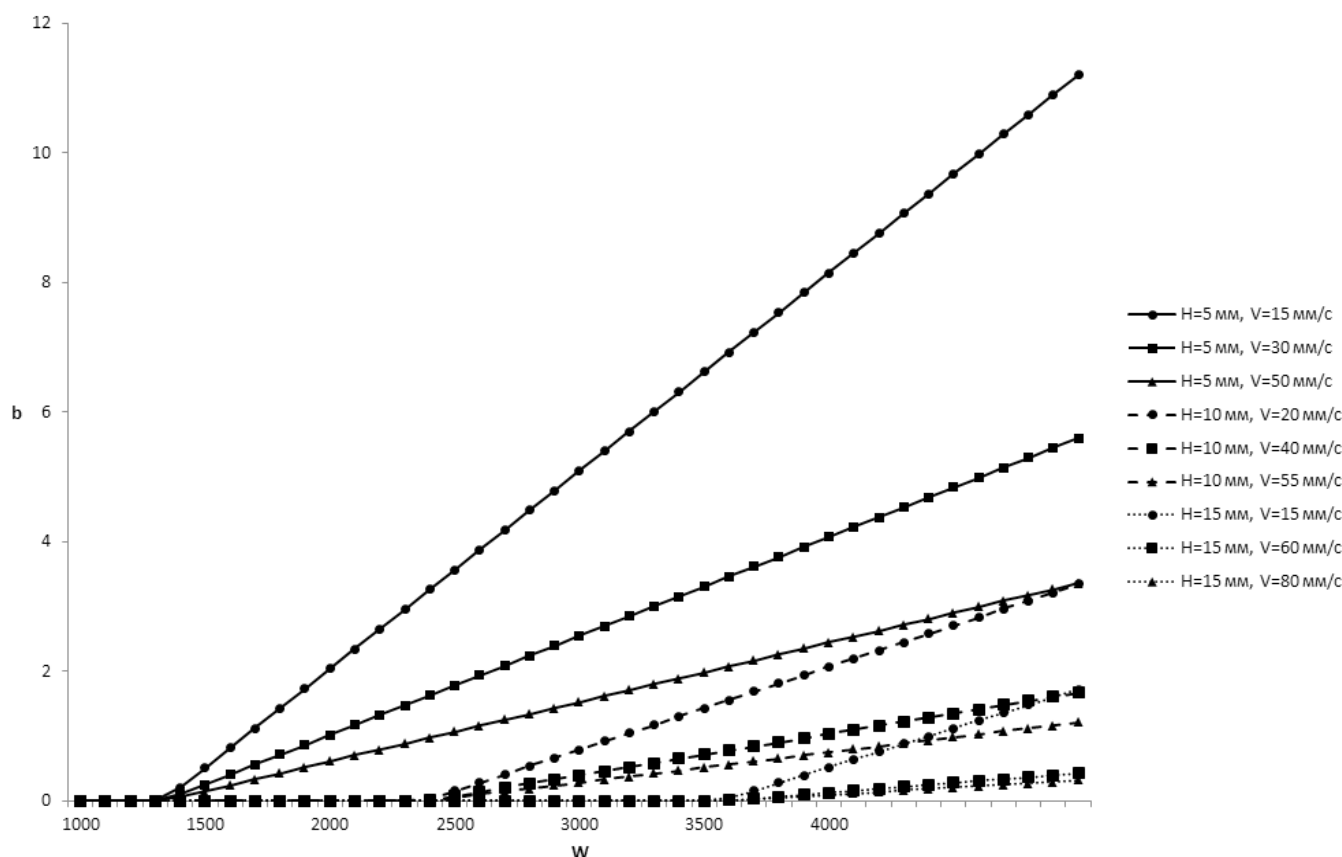


Рисунок 4. Зависимость ширины реза  $b$  от мощности излучения  $W$ , при различных толщинах листа  $h$  и скоростях  $V$ .

ности. Полученные значения в исследовании значения нельзя использовать при расчете минимальной ширины реза, потому что они не учитывают глубину. Это значит что нет гарантии того что при подборе оптимальных параметров мощности, скорости и ширины листа ЛТК сможет прорезать металл.

В работе [15] описывается безразмерный параметр  $\sigma$ , который характеризует отношение удвоенной мощности излучения к энергии, которую необходимо затратить на нагрев металла до температуры плавления, а затем его расплавить. Параметр  $\sigma$  описывается следующим выражением:

$$\sigma = 2W / [\pi \omega_0^2 V (\rho_m \lambda + \rho_s c (T_m - T_0))], \quad (8)$$

где  $W$  — мощность лазерного излучения, Вт;  $\omega_0$  — радиус пучка в фокальной плоскости ( $\omega_0 \sim 0,1$  мм), мм;  $V$  — скорость резки, мм/с;  $\rho_m$  — плотность жидкого металла, г/мм<sup>3</sup>;  $\lambda$  — удельная теплота плавления металла, Дж/г;  $\rho_s$  — плотность твердого металла, г/мм<sup>3</sup>;  $c$  — удельная теплоемкость металла при комнатной температуре, Дж·г<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $T_m$  — температуры плавления металла, К;  $T_0$  — температуры окружающей среды, К;

Там же в виде графика представлено исследование зависимости глубины разрушения нержавеющей стали от параметра  $\sigma$  для CO<sub>2</sub> лазера. При аппроксимации графика получено уравнение полиномиальной регрессии четвертого порядка, которое позволяет рассчитать глубину реза:

$$d = 1.7884 * 10^{-7} \sigma^4 - 7.8963 * 10^{-5} \sigma^3 + 0.01 \sigma^2 + 0.5953 \sigma - 2.2746, \quad (9)$$

где  $d$  — глубина реза, мм.

С помощью полученного выражения (9), предварительно рассчитав  $\sigma$  (8), можно получить минимальную ширину реза с учетом разрезания металла для различных параметров ЛТК. Возможен также поиск оптимальных параметров для задачи  $b \rightarrow \min$  с дополнительным ограничением  $d \geq h$ . На рисунке 5 представлено распределение оптимальной скорости резки, полученное при исследовании оптимизации скорости резки.

Небольшие интервалы допустимых значений оптимизируемых параметров позволяют использовать

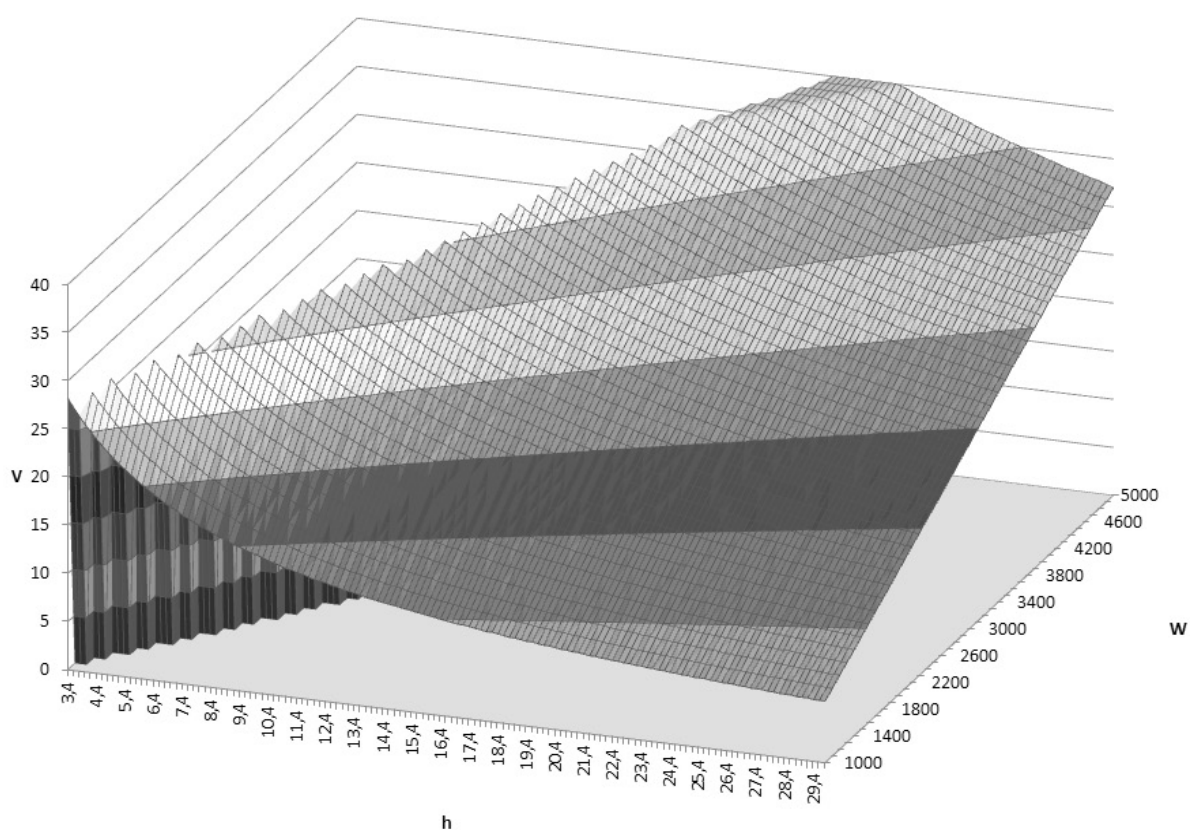


Рисунок 5. Зависимость оптимальной скорости  $V$  от мощности излучения  $W$  и толщины листа  $h$  и при наименьшей ширине реза  $b$  с условием разрезания металла.

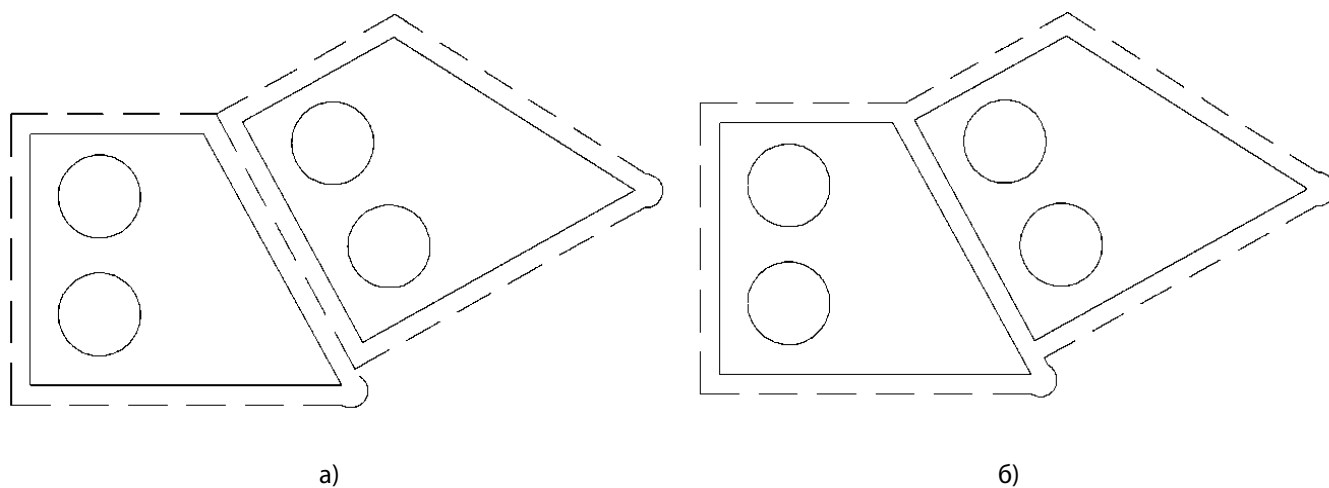


Рисунок 6. Соприкосновение идентичных элементов заготовок. а — Формирование двойного технологического зазора, б — аннулирование технологического зазора у одной из заготовок.

метод равномерного поиска [16]. При помощи разработанного программного обеспечения перед началом гравитационной утряски можно оптимизировать как все параметры, так и отдельные. Например, если оператором указана только толщина листа, то про-

грамма определит оптимальную мощность и скорость. После определения оптимальных параметров, программа накладывает на каждую заготовку технологический зазор в виде описанной оболочки и запускает утряску.

В случае соприкосновении идентичных элементов заготовок получается двойной технологический зазор (рисунок 6а). В таком случае режущий инструмент будет проходить по границе соприкасаемых заготовок дважды. Для решения этой проблемы гравитационная модель во время формирования карт раскроя отслеживает соприкосновения идентичных элементов заготовок и аннулирует у одной из заготовок начальный технологический зазор в месте соприкосновения (рисунок 6б).

Если в процессе моделирования заготовки перестают соприкасаться, то начальные зазоры восстанавливаются. Данный способ позволяет получить более плотную карту раскроя и уменьшить путь режущего инструмента, то есть время и себестоимость раскроя.

Поставленная во введении к статье цель достигнута. На основе уравнения баланса энергии лазерной резки получено выражение для расчета технологического зазора на основании параметров ЛТК, физических свойств металла и толщины листа. Для получения выражения расчета глубины разрезания использовался безразмерный параметр  $\sigma$ , характеризующий отношение удвоенной мощности излучения к энергии, которую необходимо затратить на нагрев металла до температуры плавления, а затем его расплавить. На основе выражений разработан и внедрен в гравитационную модель модуль расчета минимального зазора путем подбора оптимальной скорости резки, мощности лазера и толщины листа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная резка металлов. М.: Высш. шк., 1988. 127 с.
2. Симонова Л. А. Методология построения интегрированного информационного обеспечения гибких производственных систем механической обработки на машиностроительных предприятиях. СПб.: Инфо-ДА, 2004. 198 с.
3. Оришич А. М., Фомин В. М. Актуальные проблемы физики лазерной резки металлов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 176 с.
4. Портнов С. М., Кисаев И. Н., Кузнецов И. Н. Оптимизация режимов лазерной резки металлов в среде кислорода. // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация, 2010. № 3. Т. 56. С. 50–54.
5. Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б. Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением CO<sub>2</sub>-лазера. // Квантовая электроника, 2012. № 7. Т. 42. С. 640–644.
6. Зайцев А. В., Ковалев О. Б., Смирнова Е. М. Анализ влияния характеристик излучения газового (CO<sub>2</sub>) и волоконного лазеров на форму и глубину разрушаемой поверхности металла // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика, 2014. № 1. Т. 9. С. 62–69.
7. Дьяченко Ю. В., Маковецкий А. В., Хитрых Е. Е. Численное моделирование процессов лазерной резки листовых авиационных материалов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, 2014. Вып. 63. С. 104–114.
8. Майоров В. С., Майоров С. В., Хоменко М. Д., Гришаев Р. В. Остаточные деформации и дефекты при лазерной резке // Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине. Тр. Х межвуз. науч. шк. молодых специалистов. М.: Изд-во МГУ имени М. В. Ломоносова, 2009. С.30–34.
9. Мурзакаев Р. Т., Лялин Д. А. Алгоритм уплотнения карты раскроя на основе двумерной гравитационной имитационной модели // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки», — 2013. -№ 9–10. —с. 34–41.
10. Лялин Д. А. Имитационный алгоритм улучшения решений задачи раскроя упаковки материалов // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика, 2014. С. 113–118.
11. Лялин Д. А. Трехмерная гравитационная модель для решения задач раскроя упаковки материалов // Новый университет. Серия: технические науки, 2015. № 9–10. С. 5–9.
12. Лялин Д. А. Алгоритм преобразования плоских заготовок в объемные для трехмерной гравитационной модели // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика, 2015. С. 139–142.
13. Краткий справочник металлста / Под общ.ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. М.: Машиностроение, 1986. 960 с.
14. Бородулин Г. М., Мошкевич Е. И. Нержавеющая сталь М.: Металлургия, 1973. 320 с.
15. Зайцев А. В., Ковалев О. Б., Смирнова Е. М. Анализ влияния характеристик излучения газового (CO<sub>2</sub>) и волоконного лазеров на форму и глубину разрушаемой поверхности металла // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2014. Т. 9. № 1. С. 62–69.
16. Затонский А. В. Информационные технологии: Разработка информационных моделей и систем. М.: ИЦ Риор, 2014. 344 с.
17. Simonova L. A., Khisamutdinov M. R. Intellectual model control data of the module integration SAP-ERP and teamcenter PLM // World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 25. № 8. С. 1258–1262.