

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

PACS numbers: 07.05.Tr, 42.62.Cf, 46.25.Hf, 61.80.Ba, 62.20.D-, 81.20.Ev, 83.10.Ff

Расчёт остаточных напряжений при селективном лазерном плавнении порошков

А. В. Гусаров*, И. С. Малахова-Зяблова*, А. В. Пересторонина

*ФГБОУ ВПО Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
пер. Вадковский, 3^а,
127055 Москва, Россия*
**Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne,
58 rue Jean Parot,
42023 Saint-Etienne, France*

Селективное лазерное плавление (СЛП) применяется для быстрого прототипирования и изготовления функциональных деталей из порошков по компьютерным моделям. Основное приближение используемой здесь модели формирования остаточных напряжений состоит в определении чёткой границы задаваемой при постановке задачи зоны релаксации термонапряжений. Второе модельное допущение — упругая деформация внутри зоны релаксации термонапряжений при охлаждении. Вертикальная пластина, выращенная методом СЛП на жёсткой подложке, подвержена одноосному растяжению, а горизонтальная — изотропному двухосному растяжению. Максимальные продольные растягивающие остаточные напряжения в отдельных валиках примерно вдвое превосходят максимальные поперечные. Остаточные напряжения не зависят от градиента температуры и скорости охлаждения. Результаты расчётов могут использоваться для оценки термомеханической стойкости материалов в данном процессе.

Селективне лазерне топлення (СЛТ) застосовується для швидкого прототипування та виготовлення функціональних деталей з порошків за комп'ютерними моделями. Основне наближення використуваної тут моделі формування залишкових напружень полягає у визначенні чіткої межі заданої при постановці задачі зони релаксації термонапружень. Друге модельне припущення — пружна деформація всередині зони релаксації термонапружень при охолодженні. Вертикальна пластина, вирощена методом СЛТ на жорсткій підложці, зазнає одновісного розтягу, а горизонтальна — ізотропного двовісного розтягу. Максимальні поздовжні розтяжні залишкові напруження в окремих валиках приблизно вдвічі

перевищують максимальні поперечні. Залишкові напруження не залежать від градієнту температури та швидкості охолодження. Результати розрахунків можна використовувати для оцінки термомеханічної стійкості матеріалів у цьому процесі.

Selective laser melting (SLM) is used for rapid prototyping and manufacturing of functional parts from powders, using computer models. First assumption used in a given model for the formation of residual stresses is a definition of distinguished boundary. The second model assumption is only elastic strain in the relaxation zone of thermal stresses during cooling. Vertical plate, grown by the SLM on a rigid substrate, is subjected to uniaxial stretching, and the horizontal plate is subjected to isotropic biaxial stretching. Maximum longitudinal tensile residual stresses in the individual cylinders approximately twice exceed the maximum transverse stresses. Residual stresses are independent on the temperature gradient and the cooling rate. Results can be used to evaluate the thermomechanical stability of materials in the SLM process.

Ключевые слова: остаточные термические напряжения, лазерная обработка, плавление.

(Получено 18 февраля 2013 г.; окончат. вариант — 5 июня 2013 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Селективное лазерное плавление (СЛП) является одним из направлений, интенсивно развивающихся в последнее время аддитивных технологий. Оно применяется для быстрого прототипирования и изготовления функциональных деталей из порошков по компьютерным моделям. Геометрическая форма придаётся детали послойным методом, в котором многократно чередуются этапы механического нанесения тонкого плоского слоя порошка (толщиной около 50–100 мкм) и его селективного сканирования сфокусированным лазерным пучком (диаметр пятна также около 50–100 мкм). В рассчитываемой для каждого слоя по компьютерной модели зоне сканирования порошок локально разогревается, в результате чего его частицы сплавляются между собой и с предыдущим переплавленным слоем, образуя, в конечном счёте, монолит заданной формы, погруженный в несвязанный порошок. Остаётся лишь вынуть готовую деталь из технологического контейнера с порошком, а также освободить от него внутренние полости. Подробности процесса СЛП подробно описаны в монографиях [1–6].

Методом СЛП удаётся получать детали сложной формы, недоступной в рамках других технологий, сокращая, таким образом, трудоёмкие операции сборки. Корректировка формы требует вмешательства лишь на уровне компьютерной модели, что очень удоб-

но при изготовлении единичных деталей и мелких серий. К настоящему времени достигнуто высокое качество при использовании пластичных металлов и сплавов, например аустенитных сталей. Благодаря отсутствию пор и трещин и равномерной мелкозернистой структуре указанные материалы, полученные СЛП, часто имеют улучшенные прочностные характеристики [2]. В то же время, СЛП более хрупких материалов может вызывать недопустимое растрескивание. Так, долгое время не удавалось использовать в этой технологии высокопрочные титановые сплавы типа ВТ6, хотя в последнее время достигнуты успехи и с этим сплавом [7].

Большое количество технологических параметров и широкое разнообразие применяемых материалов наряду с экономическими факторами, вынуждающими сейчас применять СЛП лишь для единичных изделий и мелких серий, ставят на первое место вопросы выбора устойчивых режимов обработки и оптимизации, которые часто занимают большую часть производственного времени [8, 9]. Для этого успешно применяется математическое моделирование [10]. Современное понимание физики переноса лазерного излучения в порошковых слоях и тепловых процессов в зоне лазерного воздействия при СЛП отражено в работах [1–3, 10]. Вопросы оценки устойчивости процесса и качества получаемой микро- и макроструктуры методом моделирования обсуждаются, например, в [11–15]. В то же время, физика возникновения остаточных напряжений, ответственных за возможные растрескивание и отклонение формы детали от заданной, изучена недостаточно.

Общепризнанная практика состоит в том, что для снижения остаточных напряжений при термической обработке следует уменьшать градиенты температуры и скорости нагрева и охлаждения [4–6, 16]. Это подтверждается, например, при вытягивании монокристаллов из расплава [17]. Такой подход работает и при лазерной обработке [18], хотя его трудно осуществить, так как уменьшение скорости нагрева/охлаждения означает пропорциональное уменьшение производительности, а уменьшение градиента температуры, вообще противоречит принципу локального лазерного нагрева. Универсальным методом, широко применяемым при лазерной обработке, в последнее время стал предварительный нагрев детали [19, 20]. Для снижения остаточных напряжений при СЛП построение детали проводят в нагретом контейнере [20]. Действие предварительного нагрева обычно объясняют двумя факторами [21]: во-первых, уменьшается общий перепад температуры в детали, а пропорционально ему уменьшаются и градиенты температуры, и скорости нагрева/охлаждения, а во-вторых, при повышенных температурах материалы часто становятся более пластичными и напряжения могут хотя бы частично релаксировать.

Ранее предпринимались попытки построить термомеханические

численные конечно-элементные модели возникновения остаточных напряжений в процессе лазерной наплавки [22], в котором зона взаимодействия лазерного излучения с материалом подобна зоне взаимодействия при СЛП, но обычно отличается на порядок большими пространственными размерами. Численная термоупругая модель, непосредственно применимая к СЛП, представлена в [23]. В работе [23] вычисления сделаны для отдельных валиков, полученных на плоской поверхности полубесконечной подложки, а в [22] — для нескольких параллельно наложенных друг на друга и на подложку валиков. Более сложные геометрии не рассматривались. Несмотря на продемонстрированное удовлетворительное совпадение с экспериментом результатов моделирования [22, 23] и подтверждение в [23] методики предварительного подогрева для снижения остаточных напряжений остаётся открытым вопрос об обобщении полученных в упомянутых работах результатов на геометрические формы и материалы, отличные от рассмотренных в них.

Настоящая работа основана на предшествующих ей [22, 23] и посвящена разработке более общей методики оценки остаточных напряжений при СЛП, применимой к разнообразным материалам и геометриям.

2. МОДЕЛЬ

Локальный нагрев материала в зоне лазерного воздействия приводит к его расширению и возникновению сжимающих напряжений. По прохождении лазерного пучка материал снова сжимается, и возникшие термонапряжения снимаются. Наблюдающееся на практике формирование остаточных напряжений в результате теплового воздействия связано с полной или частичной релаксацией термонапряжений. Тогда при охлаждении зоны релаксации до исходного состояния в ней должны возникнуть остаточные растягивающие напряжения, а в окружающем зону релаксации материале — компенсирующие их остаточные сжимающие напряжения. Такое распределение остаточных напряжений, действительно, характерно для лазерной обработки. Таким образом, модель классической термоупругой среды, полезная для оценки термонапряжений, становится совершенно неприменимой для расчёта остаточных напряжений.

Формирование остаточных напряжений часто рассчитывают по моделям упругопластической или вязкоупругой сред. Примером такого подхода служат вышеупомянутые работы [22, 23]. Не говоря о сложности численных расчётов, такие модели содержат большое количество параметров, среди которых и параметры движущегося или нестационарного теплового источника, и теплофизические свойства среды, и температурные зависимости вязкости и предела

текучести. Поэтому полученные результаты сложно даже проанализировать и, тем более, экстраполировать на материалы, отличные от тех, для которых выполнены численные расчёты. Это снижает практическую пользу от таких расчётов. С другой стороны, теплофизические и вязко-упруго-пластические свойства материалов при высоких температурах часто неизвестны, либо даются с большой погрешностью. Также и погрешность измерения остаточных напряжений, валидирующего математическую модель может значительно превышать точность расчёта. Таким образом, детальное описание с помощью термовязко-упругопластических моделей часто становится избыточным применительно к процессам лазерной обработки, в частности СЛП.

Альтернативный подход, предложенный в [23], предполагает явное выделение зоны релаксации термонапряжений при постановке задачи. Учитывая, что лазерное плавление и образование ванны расплава со свободной поверхностью предполагает практически полное снятие напряжений в ней, граница зоны релаксации может оцениваться по тепловой модели как граница максимального проплавления. Зона эффективной релаксации может быть и больше зоны переплавления, если при повышенных температурах ещё в твёрдом состоянии под действием термонапряжений происходит вязкое и/или пластическое течение. Тогда за границу зоны релаксации может быть, например, принята огибающая в общем случае нестационарной изотермы эффективной релаксации термонапряжений. Преимущество такой постановки — в отсутствии жёсткой связи между тепловой и механической задачами. Например, во многих видах лазерной обработки геометрия переплавленной области или области достижения определённой температуры задаётся как условие. Тогда подбор необходимых параметров теплового источника ведётся по тепловой модели, а оценка остаточных напряжений — по механической, которая становится, фактически, независимой. Такое разделение тепловых и механических параметров может быть полезно для теоретического анализа. Не составляет исключения и СЛП, где геометрия зоны переплавления, если и не задаётся заранее, то не отличается большим разнообразием.

Таким образом, основное приближение, сделанное в используемой здесь модели формирования остаточных напряжений [23], состоит в определении чёткой границы задаваемой при постановке задачи зоны релаксации термонапряжений. После прохождения теплового источника и охлаждения до исходной температуры связь между тензорами напряжения с компонентами $\sigma_{\beta\gamma}$ и деформации с компонентами $\varepsilon_{\beta\gamma}$ вне зоны релаксации задаётся обобщённым законом Гука [24]

$$\sigma_{\beta\gamma} = \lambda\theta\delta_{\beta\gamma} + 2\mu\varepsilon_{\beta\gamma}, \quad (1)$$

где λ — первый параметр Ляме, μ — модуль сдвига, $\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ — объёмная деформация, $\delta_{\beta\gamma}$ — символ Кронекера, а индексы β и γ принимают значения x , y и z , соответствующие декартовым осям.

Второе модельное допущение — упругая деформация внутри зоны релаксации термонапряжений при охлаждении — позволяет записать обобщённый закон Гука в этой зоне после её охлаждения до исходной температуры в виде [24]

$$\sigma_{\beta\gamma} = \lambda\theta\delta_{\beta\gamma} + 2\mu\varepsilon_{\beta\gamma} + 3sK\delta_{\beta\gamma}, \quad (2)$$

где K — модуль всестороннего сжатия, а s — линейная усадка при охлаждении от температуры релаксации термонапряжений T_m до исходной температуры T_a , которую можно рассчитать по линейному коэффициенту теплового расширения α как

$$s = \int_{T_a}^{T_m} \alpha dT. \quad (3)$$

Температуру релаксации T_m можно оценить как температуру плавления, либо как температуру размягчения. Под исходной температурой T_a понимается либо температура окружающей среды, либо температура предварительного нагрева. Последний член правой части уравнения (2) вводит всестороннее растяжение в зону релаксации, величина которого выбрана так, чтобы компенсировать тепловое расширение при температуре релаксации. Остаточные напряжения, рассчитанные по уравнению (2), также как и линейную усадку (3), следует, прежде всего, проверить по критериям неупругой деформации и разрушения. В случае удовлетворения этих критериев остаточные напряжения должны быть соответствующим образом откорректированы.

В общем случае, расчёт по описанной модели даёт остаточные напряжения, которые сформировались бы после охлаждения зоны обработки до исходного состояния при условии отсутствия неупругой деформации и разрушения на стадии охлаждения, а их величина позволяет оценить вероятность недопустимой деформации, либо разрушения. Примеры применения даны ниже.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку технология СЛП рассчитана на изготовление деталей сложных форм, охватить всё возможное их разнообразие практически невозможно, а в разделах 3.1 и 3.2 рассматриваются лишь простейшие формы, которые можно, однако, считать предельными по типу напряжённого состояния. В разделе 3.3 модель применяется не к детали в целом, а к отдельному валику на плоской поверхности

толстой подложки. Эти результаты являются общими, так как детали любых форм строятся из однотипных валиков, и позволяют оценить остаточные напряжения на стадии производства. Под подложкой здесь может пониматься не только сама подложка, на которой строится деталь, но и массив предыдущих переплавленных слоёв, составляющих уже построенную часть детали.

3.1. Вертикальная пластина

Вертикальная стенка, выращенная на подложке, показанная на рис. 1, *a*, служит модельной формой, используемой в экспериментах по СЛП, и, в то же время, это часто встречающийся элемент разнообразных облегчённых конструкций и поверхностных рельефов. Всё тело стенки построено из переплавленного порошка, поэтому её можно считать зоной релаксации термонапряжений и применять к ней уравнение (2). В то же время практически вся подложка остаётся непереплавленной, и в ней действует уравнение (1). В случае массивной подложки, она препятствует продольной деформации стенки, поэтому вдали от краёв стенки продольная деформация отсутствует

$$\varepsilon_{xx} = 0, \tag{4}$$

а вдали от подложки нет сил, действующих ни в поперечном, ни в вертикальном направлениях, поэтому

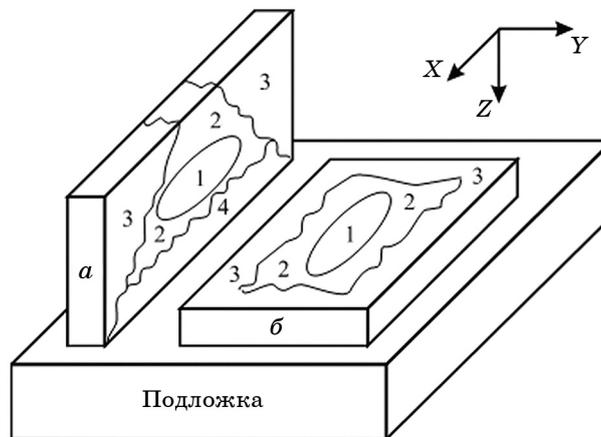


Рис. 1. Вертикальная (*a*) и горизонтальная (*б*) пластины, выращенные методом СЛП на подложке: 1 — расчётная область, 2 — переходная область, 3 — краевая зона разгрузки, 4 — зона влияния подложки, XYZ — декартов базис.

$$\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0. \quad (5)$$

Расположение осей координат дано на рис. 1. Совместное решение уравнений (2), (4) и (5) даёт продольное напряжение

$$\sigma_{xx} = sE, \quad (6)$$

где E — модуль Юнга.

Таким образом, в расчётной области вертикальной стенки действует одноосное растяжение. Расчётная область показана на рис. 1, а. Точки этой области должны быть удалены от подложки на расстояние, гораздо большее толщины стенки, а от вертикальных краёв — на расстояние, гораздо большее высоты стенки. Если для пластичного материала напряжение σ_{xx} , рассчитанное по уравнению (6), превышает предел текучести, и при этом линейная усадка s не превышает удлинения при разрыве, то пластическое течение приведёт к ограничению продольного напряжения величиной предела текучести. В случае хрупкого материала уравнением (6) можно пользоваться вплоть до предела прочности на разрыв. Полученные напряжения в вертикальной стенке могут использоваться для оценки возможности её разрушения при построении методом СЛП, а также для расчёта подложки на изгиб, что важно при выборе её толщины.

3.2. Горизонтальная пластина

Горизонтальная пластина на подложке, показанная на рис. 1, б, моделирует покрытие, либо протяжённую низкую деталь. Так же, как и в предыдущем случае, жёсткая подложка препятствует поперечному смещению, поэтому вдали от краёв пластины

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0, \quad (7)$$

а свободная верхняя поверхность исключает силы в вертикальном направлении, значит

$$\sigma_{zz} = 0. \quad (8)$$

Совместное решение уравнений (2), (7) и (8) даёт напряжения

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{sE}{1-\nu}, \quad (9)$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Таким образом, горизонтальная пластина, выращенная на жёст-

кой подложке, подвержена изотропному двухосному растяжению. Так как коэффициент Пуассона лежит в пределах от 0 до 1/2, величина растягивающих напряжений больше, чем в вертикальной пластине. Полученный результат применим в расчётной области, показанной на рис. 1, б, при условии упругой деформации при охлаждении. Корректировка на возможное пластическое течение и хрупкое разрушение такие же, как и для вертикальной пластины, описанной в предыдущем разделе.

3.3. Валик на полубесконечной подложке

Типичные для СЛП конфигурации переплавленных валиков показаны на рис. 2. Важно, что нижняя часть валика заходит в подложку, обеспечивая металлургический контакт переплавляемого порошка с подложкой. Геометрия (а) соответствует предельно малому количеству порошка, по сравнению с переплавляемым материалом подложки, а в геометриях (б) и (в) доля порошка последовательно возрастает. В направлении валика задача однородна, а смещение среды отсутствует. Тензор деформаций выражается через вектор смещения в плоскости (YZ), $\mathbf{u} = (u_y, u_z)$:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xz} = 0, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right). \quad (10)$$

Баланс сил в направлениях Y и Z даёт следующие два уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} = 0, \quad (11)$$

подстановка в которые закона Гука в виде (1) либо (2) приводит к системе уравнений относительно смещений \mathbf{u} . Пример численного решения этой системы для конфигураций, показанных на рис. 2, а,

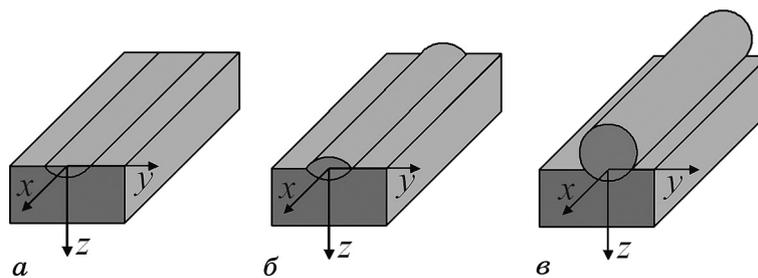


Рис. 2. Отдельные переплавленные валики на полубесконечной подложке.

б, дан на рис. 3. Эквивалентное напряжение Мизеса рассчитано по формуле

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}, \quad (12)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 — главные напряжения.

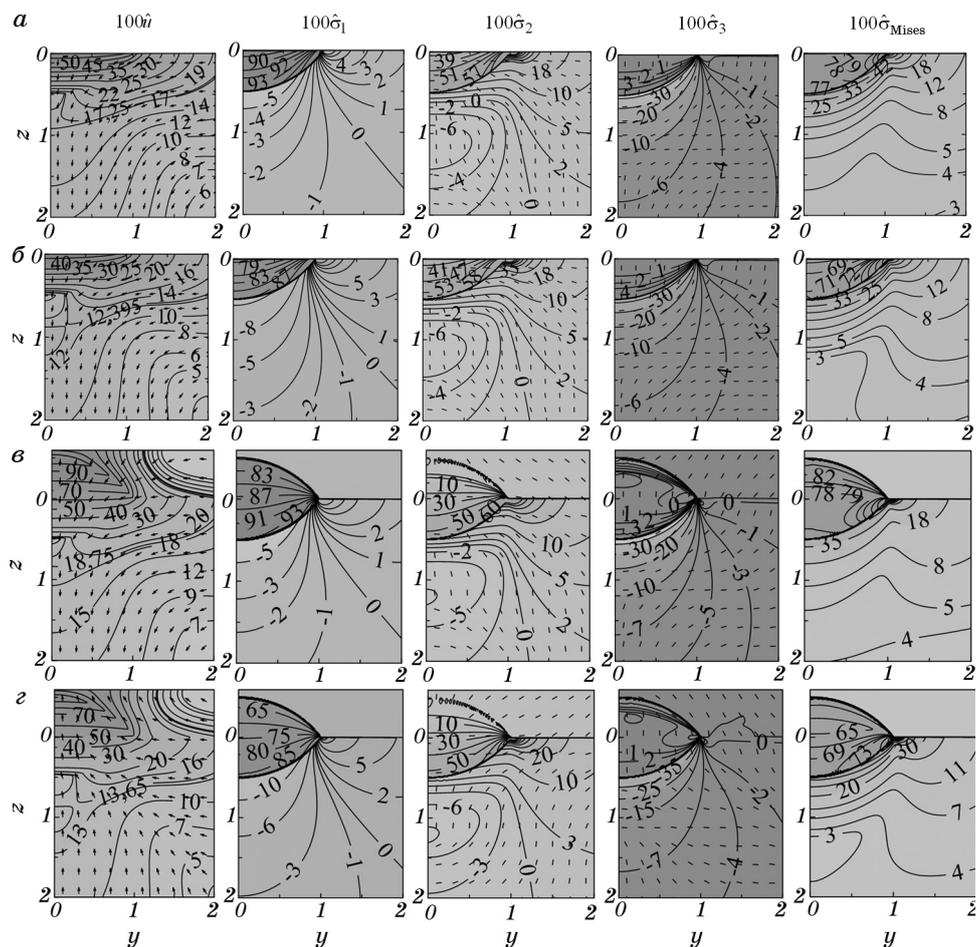


Рис. 3. Безразмерные остаточные смещения \hat{u} , главные остаточные напряжения $\hat{\sigma}_1 = \hat{\sigma}_{xx}$, $\hat{\sigma}_2$, $\hat{\sigma}_3$ и эквивалентные напряжения Мизеса $\hat{\sigma}_{\text{Mises}}$ в изолированных переплавленных валиках с конфигурациями, показанными на рис. 2, а, б и в прилегающих областях подложки для коэффициентов Пуассона $\nu = 0,17$ (а) и (в) и $0,34$ (б) и (з); направление смещения показано стрелками; направления главных осей в плоскости YZ показаны штрихами.

Безразмерные значения здесь вычисляются по следующим формулам:

$$\hat{\mathbf{u}} = \frac{\mathbf{u}}{u_0}, \quad \hat{\sigma}_{\beta\gamma} = \frac{\sigma_{\beta\gamma}}{\sigma_0}. \quad (13)$$

Тут нормирующие значения смещения u_0 и напряжения σ_0 соответствуют максимальным значениям этих величин в горизонтальной пластине единичной толщины:

$$u_0 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} s, \quad \sigma_0 = \frac{sE}{1 - \nu}. \quad (14)$$

Задача термоупругости не содержит характерного размера, поэтому координаты на рис. 3 даны в произвольных единицах. В тех же самых единицах измеряются \mathbf{u} и u_0 .

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение соответствующих безразмерных эпюр для изолированных валиков на рис. 3, *a*, *б*, а также на рис. 3, *в*, *г*, полученных при разных коэффициентах Пуассона, не показывает ни качественных, ни значительных количественных различий между ними. Это позволяет предположить, что основная зависимость от коэффициента Пуассона в геометрии изолированного валика такая же, как для горизонтальной пластины, и даётся уравнениями (14). Видно также, что значения напряжений в области ниже поверхности подложки, которые являются критическими для разрушения и пластического течения, слабо зависят от высоты валика над поверхностью. Этим обобщается вывод работы [23], полученный для кварцевого стекла.

Общепринятые методы снижения остаточных напряжений при СЛП, такие как предварительный нагрев и выбор материала с меньшими тепловым расширением, упругим модулем или температурой плавления следуют из уравнений (6), (9), а также из второго уравнения (14). Видно также, что повышение коэффициента Пуассона выгодно для снижения остаточных напряжений в отдельных валиках и горизонтальной пластине. В то же время, результаты данной работы показывают, что остаточные напряжения не зависят от пространственного размера, следовательно, и от градиента температуры. Скорость охлаждения также не находится в числе параметров модели. Поэтому создаётся впечатление, что эти выводы противоречат накопленному опыту. Заметим, что это не совсем так. Например, предварительный нагрев уменьшает общий перепад температуры в детали, тем самым снижая и градиент, и скорость охлаждения.

Из модельного уравнения (2) следует, что в пределах упругой деформации остаточные напряжения пропорциональны линейной тепловой усадке s , которая примерно пропорциональна перепаду температуры в обрабатываемой детали согласно уравнению (3). В традиционных печных технологиях термообработки этот перепад температуры не фиксируется, но известно, что он пропорционален градиенту температуры в неоднородных процессах и скорости нагрева/охлаждения в нестационарных. Поэтому приходится анализировать эти два параметра. В лазерных же технологиях с их сильно локализованным нагревом перепад температуры практически всегда заранее известен и равен $T_m - T_a$; поэтому удобнее работать с одним параметром s . Таким образом, вывод о независимости остаточных напряжений при СЛП от градиента температуры и скорости охлаждения, сделанный в [23] для кварцевого стекла и обобщаемый здесь на произвольные материалы в пределах их упругой деформации при охлаждении, следует рассматривать не как противоречие предыдущему опыту, а скорее, как предложение использовать при анализе лазерных технологий вместо этих двух параметров один — полную линейную термическую усадку s .

Заключение [23] о том, что максимальные продольные растягивающие остаточные напряжения в отдельных валиках примерно вдвое превосходят максимальные поперечные, и подтверждённые для фосфатного стекла в [25], обобщаются здесь на произвольные материалы, имеющие коэффициент Пуассона в исследованном диапазоне от 0,17 до 0,34 в пределах их упругой деформации при охлаждении после лазерной обработки.

Распределения напряжений для трёх различных геометрий отдельного валика на массивной подложке, показанных на рис. 2, очень близки. В противоположность, в вертикальной и горизонтальной пластинах, показанных на рис. 1, остаточные напряжения сильно различаются. Таким образом, возникает вопрос, как из локально одинаковых напряжённых состояний на стадии отдельных валиков формируются принципиально разные напряжённые состояния построенных из этих валиков деталей. Модель не даёт ответа на него, так как не рассматривает последовательное наложение валиков друг на друга. С уверенностью можно лишь сказать, что принципиально механическое взаимодействие детали с подложкой, на которой она строится.

На рисунке 4 рассчитанные остаточные напряжения сравниваются с пределами прочности на разрыв неметаллических материалов и пределами текучести металлических. Принятые значения свойств материалов даны в таблице. Напряжения на рис. 4 безразмерны с участием полной линейной усадки s , которая зависит от температуры предварительного нагрева T_a . Это исключает температурную зависимость расчётов, показанных линиями, и одновре-

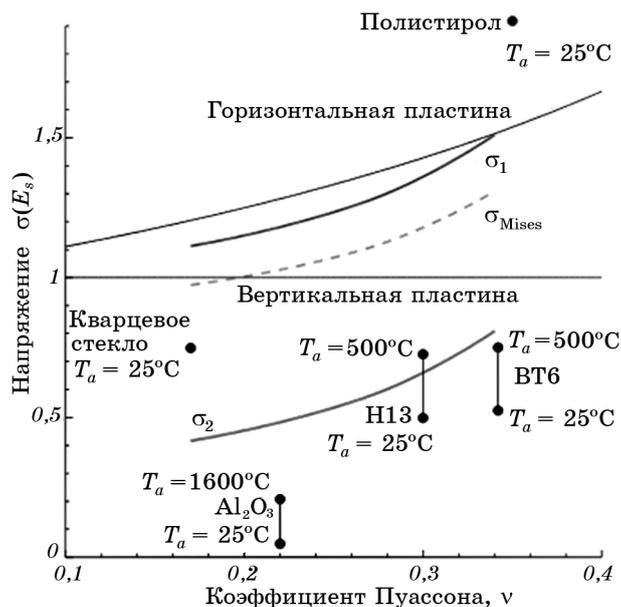


Рис. 4. Максимальные главные растягивающие остаточные напряжения, σ_1 и σ_2 , и эквивалентное напряжение Мизеса σ_{Mises} в отдельных валиках (жирные линии) и максимальные растягивающие остаточные напряжения в вертикальной и горизонтальной пластинах (тонкие линии) по сравнению с пределами прочности неметаллических материалов и пределами текучести металлических (точки). Температуры предварительного подогрева T_a указаны около точек.

менно искусственно вводит зависимость от неё безразмерных пределов прочности, показанных точками. Поэтому для каждой точки указано значение T_a .

Расчёты для вертикальной пластины, в которой формируется од-

ТАБЛИЦА. Термоупругие и прочностные свойства различных материалов, принятые для расчётов.

Материал	ν	μ , ГПа	α , 10^{-6} K^{-1}	T_m , °C	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа
Кварцевое стекло	0,17	31	0,55	1700	50	
Al_2O_3	0,22	150	8,4	2070	300	
Н13	0,3	81	10,4	1427		1650
BT6	0,34	42	7,6	1650		1030
Полистирол	0,35	1,3	80	90	60	

ноосное растяжение, могут быть непосредственно сравнены с результатами одноосных механических испытаний. Для отдельных валиков на массивной подложке рассчитано эквивалентное напряжение Мизеса, показанное на рис. 4 штриховой линией. Использование других критериев разрушения или пластического течения при сложном напряжённом состоянии также не исключается, так как приведены главные напряжения. При двухосном изотропном растяжении в горизонтальной пластине напряжение Мизеса равно напряжению вдоль любой из эквивалентных осей в плоскости растяжения.

Расчёты предсказывают растрескивание оксида алюминия, даже с предварительным подогревом до 1600°C, и отсутствие разрушения полистирола. Это соответствует известной практике СЛП. Также ожидается растрескивание объёмных деталей из кварцевого стекла, но отсутствие продольных трещин в отдельных валиках из него. Несмотря на это в экспериментах [23] не наблюдалось ни продольного, ни поперечного растрескивания валиков из этого материала. Это говорит о возможном его упрочнении при быстром охлаждении после лазерной обработки. Что касается высокопрочных металлических сплавов ВТ6 и Н13, то, скорее всего, остаточные напряжения в них доходят до пределов текучести. На этот вывод могут повлиять предварительный подогрев и возможное лазерное упрочнение, связанное с измельчением зёрен до субмикронного размера, характерное для СЛП [7].

Растрескивание титановых сплавов при СЛП научились предотвращать, проводя процесс в защитной атмосфере, исключающей окисление [7]. Поэтому механизмы их растрескивания не рассматриваются. Остаётся открытым лишь вопрос о соотношении упругих и пластических остаточных деформаций. Расчёты, показанные на рис. 4, позволяют предположить, что эти компоненты, зависящие от конкретной геометрии и от температуры предварительного нагрева, в общем, сравнимы по величине. То же самое можно сказать о соотношении упругих и пластических деформаций в стали Н13.

Таким образом, результаты приведённых расчётов могут использоваться для оценки термомеханической стойкости материалов в процессе СЛП.

5. ВЫВОДЫ

Расчёт по описанной модели даёт остаточные напряжения, которые сформировались бы после охлаждения зоны обработки до исходного состояния при условии отсутствия неупругой деформации и разрушения на стадии охлаждения.

Вертикальная пластина, выращенная методом СЛП на жёсткой

подложке, подвержена одноосному растяжению, а горизонтальная — изотропному двухосному растяжению.

Максимальные продольные растягивающие остаточные напряжения в отдельных валиках примерно вдвое превосходят максимальные поперечные в пределах упругой деформации материалов при охлаждении после СЛП.

Остаточные напряжения при СЛП не зависят от градиента температуры и скорости охлаждения при условии упругой деформации материалов при охлаждении.

Результаты приведённых расчётов могут использоваться для оценки термомеханической стойкости материалов в процессе СЛП.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Шишковский, *Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объёмных изделий* (Москва: Физматлит: 2009).
2. I. Yadroitsev, *Selective Laser Melting: Direct Manufacturing of 3D-Objects by Selective Laser Melting of Metal Powders* (Saarbrücken: Lambert Academic Publishing GmbH & Co: 2009).
3. G. G. Gladush and I. Smurov, *Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment* (Berlin: Springer: 2011).
4. И. Ю. Смуров, И. А. Мовчан, И. А. Ядройцев, А. А. Окунькова, Е. В. Цветкова, Н. Ю. Черкасова, *Вестник МГТУ СТАНКИИ*, **2**, № 4: 144 (2011).
5. И. Ю. Смуров, И. А. Мовчан, И. А. Ядройцев, А. А. Окунькова, Н. Ю. Черкасова, Г. В. Антоненкова, *Вестник МГТУ СТАНКИИ*, **1**, № 1: 36 (2012).
6. А. П. Назаров, А. А. Окунькова, *Вестник машиностроения*, № 11: 85 (2012).
7. L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeek, and J.-P. Kruth, *Acta Mater.*, **58**: 3303-12 (2010).
8. V. Yu. Fominskii, S. N. Grigoriev, A. G. Gnedovets et al., *Techn. Phys. Lett.*, **38**, Iss.: 7: 683 (2012).
9. S. N. Grigoriev, V. Yu. Fominski, A. G. Gnedovets et al., *Appl. Surf. Sci.*, **258**, Iss. 18: 7000 (2012).
10. А. В. Гусаров, *Физические модели воздействия лазерного излучения на конденсированные вещества в лазерной технологии получения материалов* (Дисс. ... д.ф.-м.н.) (Москва: ИМЕТ РАН: 2011).
11. A. V. Gusarov, I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, and I. Smurov, *J. Heat Transfer*, **131**: 072101 (2009).
12. I. Smurov, M. Doubenskaia, S. Grigoriev et al., *J. Therm. Spray Technol.*, **21**, Iss.: 6: 1357 (2012); DOI: 10.1007/s11666-012-9808-4.
13. M. Doubenskaia, M. Pavlov, S. Grigoriev et al., *J. Laser Micro Nanoengineering*, **7**, Iss.: 3: 236 (2012); DOI: 10.2961/jlmm.2012.03.001.
14. I. Yadroitsev, A. Gusarov, I. Yadroitsava, and I. Smurov, *J. Mater. Proces. Technol.*, **210**: 1624-31 (2010).
15. A. V. Gusarov and I. Smurov, *Phys. Procedia*, **5**: 381-94 (2010).
16. S. N. Grigoriev, V. Yu. Fominskii, and A. V. Gusarov, *Metal Sci. Heat Treatment*, **54**, Iss. 1-2: 34 (2012).
17. J. C. Brice, *J. Crystal Growth*, **42**: 427-30 (1977).

18. D. Triantafyllidis, L. Li, and F. H. Stott, *Surf. Coat. Technol.*, **201**: 3163-73 (2006).
19. J. Gurauskis, V. Lennikov, G. F. de la Fuente, and R. I. Merino, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **31**: 1251-56 (2011).
20. Y.-C. Hagedorn, J. Wilkes, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, *Phys. Procedia*, **5**: 587-94 (2010).
21. H. Maruo, I. Miyamoto, Y. Inoue, and Y. Arata, *J. Jap. Welding Soc.*, **51**: 182-9 (1982).
22. S. Ghosh and J. Choi, *J. Heat Transfer*, **128**: 662-79 (2006).
23. A. V. Gusarov, M. Pavlov, and I. Smurov, *Phys. Procedia*, **12**: 248 (2011).
24. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теория упругости* (Москва: Наука: 1987).
25. Е. В. Рыжков, М. Д. Павлов, А. В. Гусаров, Ю. А. Артёменко, В. В. Васильцов, *ФизХОМ*, № 1: 77 (2011).