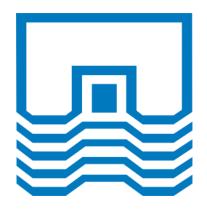
Моделирование процесса лазерной ударной проковки



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук



Лаборатория Термомеханики твердых тел

Контакты

Адрес: 614013, Россия, г. Пермь,

ул. Академика Королёва, 1

Телефон: +7(342)2378317

E-mail: poa@icmm.ru



Моделирование лазерной ударной проковки

Математическая модель



Исходные данные

Геометрия детали

Механические параметры металла

Энергетические параметры лазера

Компьютерный расчет

$$\operatorname{div}\boldsymbol{\sigma} = \rho \frac{\mathrm{d}^{2}\mathbf{u}}{\mathrm{d}t^{2}}$$

$$P_{peak} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \cdot Z \cdot I}$$

 $F = \sigma_{eq} - \left[A + B \left(\varepsilon_{eq}^{pl} \right)^{n} \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{0}} \right]$

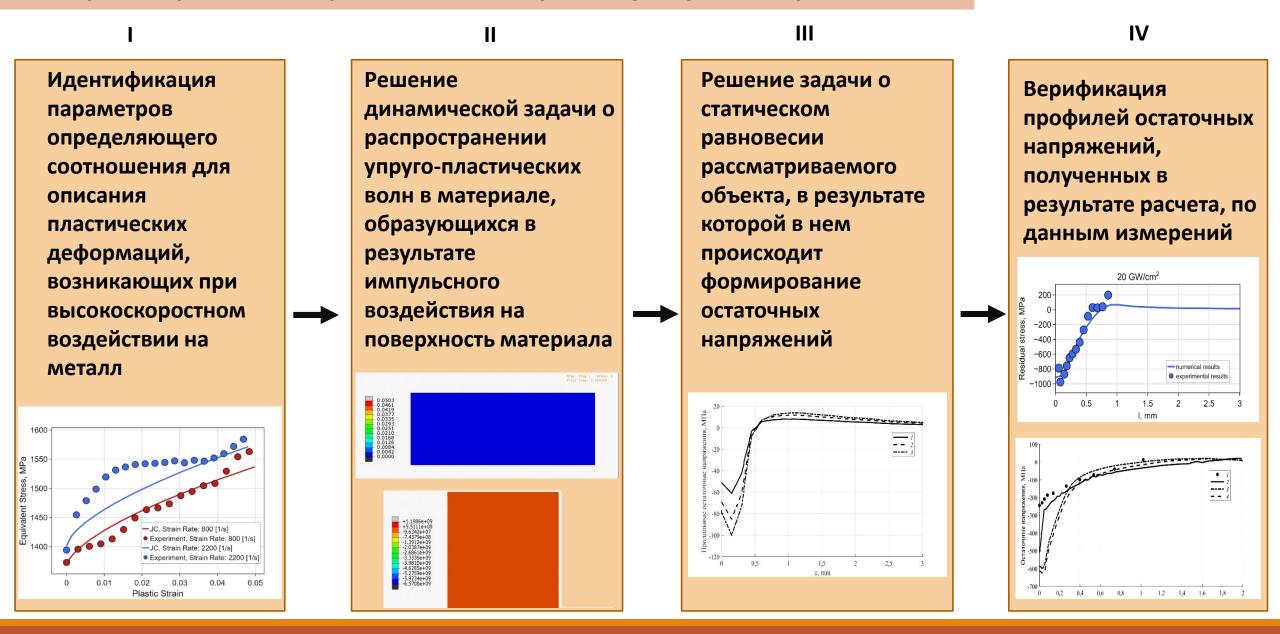
Зоти

Распределение остаточных напряжений в детали

Возможности численного моделирования:

- Получение наиболее полной картины последствий применения ударной проковки детали для конкретного режима
- Оценка положительного эффекта лазерного воздействия на конкретную деталь до начала ее обработки
- Подбор режима лазерного воздействия для конкретной детали без проведения предварительных испытаний

Алгоритм расчета процесса лазерной ударной проковки



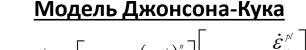
I. Идентификация параметров определяющего соотношения

Таблица 1 – Материальные параметры для соотношения Джонсона-Кука

Материал	<i>A</i> [МПа]	<i>В</i> [МПа]	n [1]	C [1]	$\dot{\mathcal{E}}_{_0}$ [1/c]
BT-6 (Ti64)	978	826	0.639	0.034	0.005
Алюминий	336	800	0.69	0.0048	0.005
(Al2024)					
Инконель	485	1490	0.654	0.023	0.005
(Inconel 718)					

1600 1500 Effective Stress [MPa] JC, Strain Rate: 0.005 [1/s] Experiment, Strain Rate: 0.005 [1/s] JC, Strain Rate: 800 [1/s] Experiment, Strain Rate: 800 [1/s] JC, Strain Rate: 2200 [1/s] Experiment, Strain Rate: 2200 [1/s] 100 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 Plastic Strain

Рисунок 1 — Аппроксимация экспериментальных диаграмм нагружения соотношением Джонсона-Кука для титанового сплава ВТ6 (Ti64)



$$\sigma_{y}(\boldsymbol{\varepsilon}_{eq}^{pl}) = \left[A + B(\boldsymbol{\varepsilon}_{eq}^{pl})^{n} \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{eq}^{pl}}{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0}} \right]$$
(1)

 $\sigma_{_{\scriptscriptstyle \mathcal{T}}}$ – интенсивность напряжения на поверхности текучести

 $\dot{\mathcal{E}}_{_{0}}$ – опорная скорость деформации

 $\mathcal{E}_{^{eq}}^{^{pl}}$ – интенсивность пластической деформации

A, *B*, *n*, *C* – материальные параметры, характеризующие неупругое поведение материала

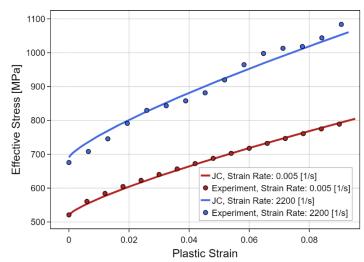


Рисунок 2 – Аппроксимация экспериментальных диаграмм нагружения соотношением Джонсона-Кука для инконеля 718 (Inconel 718)

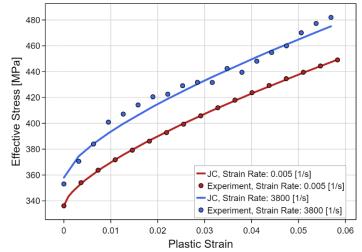


Рисунок 3 – Аппроксимация экспериментальных диаграмм нагружения соотношением Джонсона-Кука для алюминиевого сплава (Al 2024)

II. Распространение упруго-пластических волн в материале

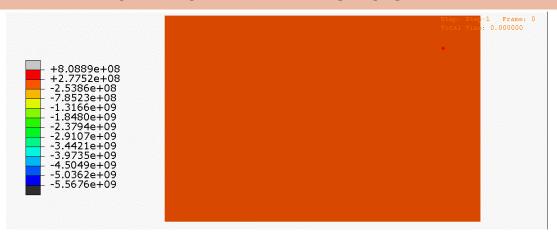


Рисунок 4 — Распределение компоненты тензора напряжений, направленной вдоль приложенной нагрузки, в процессе лазерного импульсного воздействия на цилиндрический образец



Рисунок 5 — Распределение механического давления в процессе лазерного импульсного воздействия на цилиндрический образец

Уравнение движения

$$\operatorname{div}\boldsymbol{\sigma} = \rho \frac{\mathrm{d}^2 \mathbf{u}}{\mathrm{d}t^2} \qquad (2)$$

σ – тензор напряжений

 ρ – плотность

u – вектор перемещений

t — время

Пиковое значение давления, действующего на обрабатываемую

поверхность

$$P_{peak} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \cdot Z \cdot I} \quad (3)^*$$

lpha – корректирующий множитель

Z – акустический импеданс

 I_{\parallel} – интенсивность лазерного воздействия

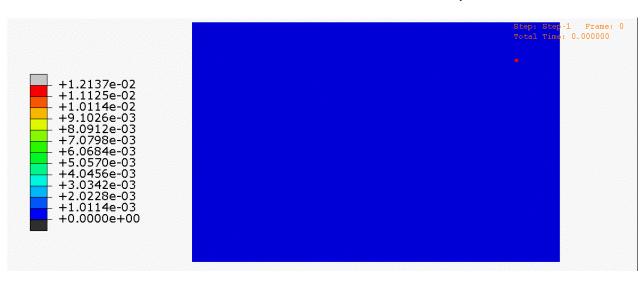


Рисунок 6 — Распределение интенсивности тензора пластической деформации в процессе лазерного импульсного воздействия на цилиндрический образец

III. Статическое равновесие

Уравнение равновесия $div \sigma = 0$ (4)

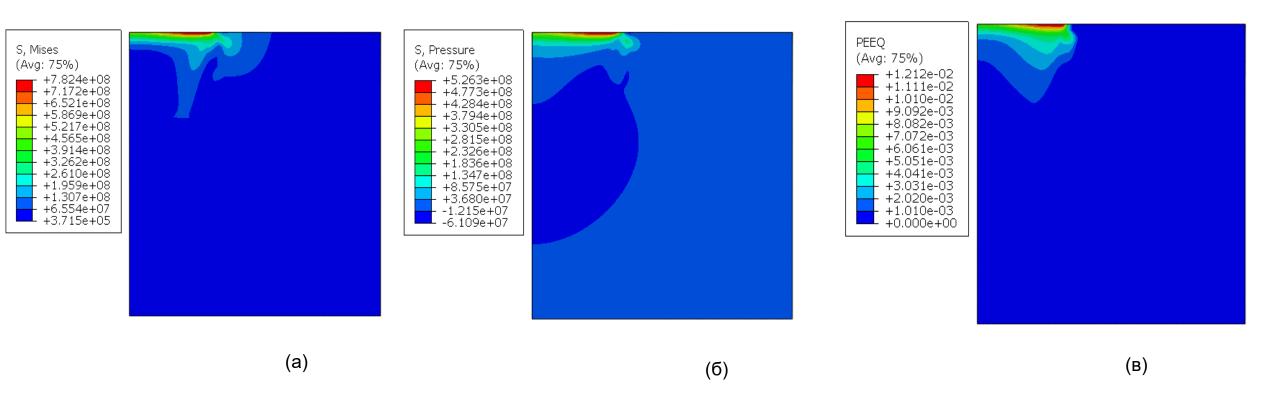


Рисунок 7 – Распределение по толщине цилиндрического образца (а) поля остаточных напряжений по Мизесу, (б) поля механического давления, (в) эффективной пластической деформации

IV. Верификация по экспериментальным профилям остаточных напряжений

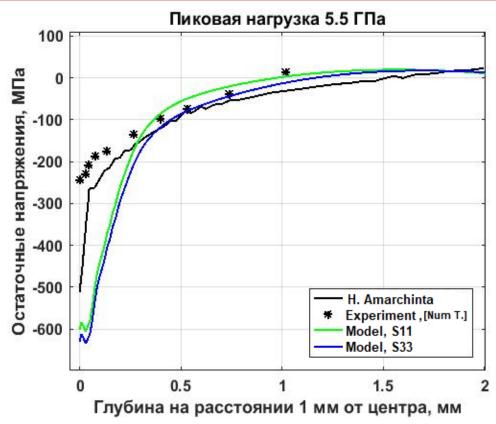


Рисунок 8 – Профили осевой и радиальной компоненты остаточных напряжений на расстоянии 1 мм от центра (маркеры – экспериментальные данные [1], черная кривая – результаты моделирования, приведенные в работе [2], зеленая и синяя кривая – результаты расчета с использованием разработанной модели)

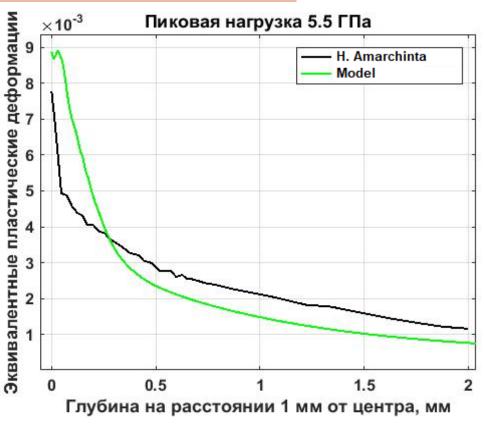


Рисунок 9 — Профили эквивалентных пластических деформаций на расстоянии 1 мм от центра (черная кривая — результаты моделирования, приведенные в работе [2], зеленая кривая — результаты расчета с использованием разработанной модели)

Моделирование остаточных напряжений в титановом сплаве ВТ-6

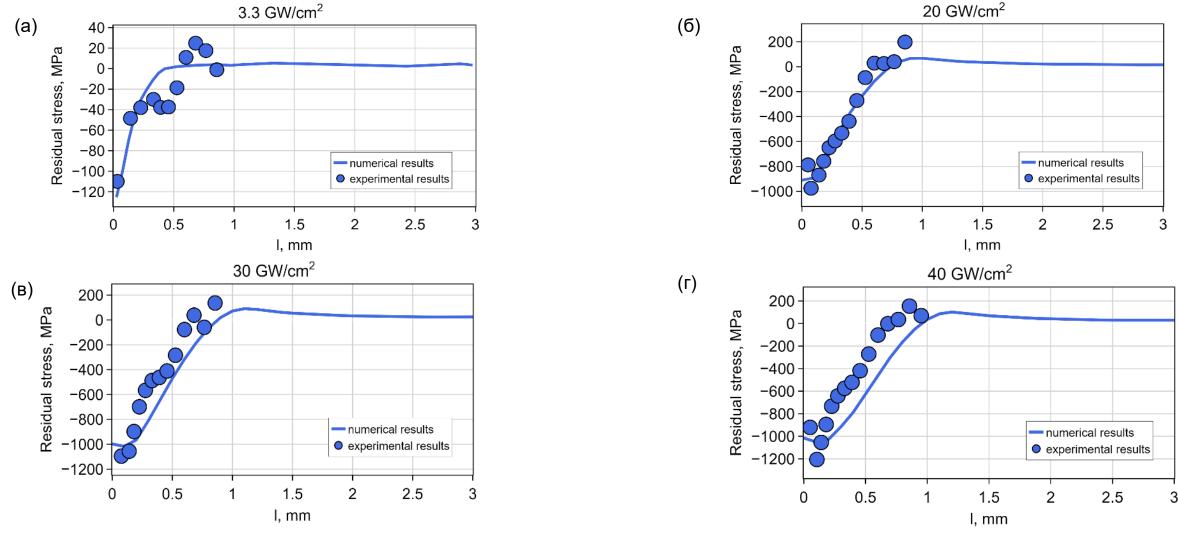


Рисунок 10 — Профили остаточных напряжений по толщине пластины, полученные при лазерной ударной проковке с пиковой интенсивностью (а) 3.3 ГВт/см² (3.1 ГПа), (б) 20 ГВт/см² (7.6 ГПа), (в) 30 ГВт/см² (9.3 ГПа), (г) 40.0 ГВт/см² (10.7 ГПа) (сплошная линия — результаты расчета; точки — результаты измерения остаточных напряжений методом сверления отверстий)

Исследование влияния параметров лазерной ударной проковки на результирующее поле остаточных напряжений

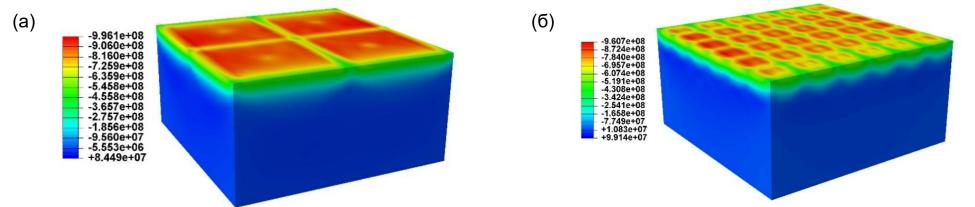


Рисунок 11 — Распределения остаточных напряжений в части пластины, обработанной методом лазерной ударной проковкой с интенсивностью 10 ГВт/см² и размером квадратного пятна (а) 3 мм, (б) 1 мм

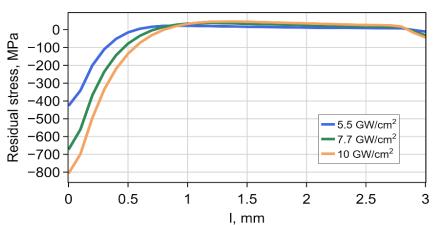


Рисунок 12 — Профили остаточных напряжений по толщине пластины, полученные при лазерной ударной проковке с размером квадратного пятна 3 мм и различным уровнем интенсивности лазерного воздействия

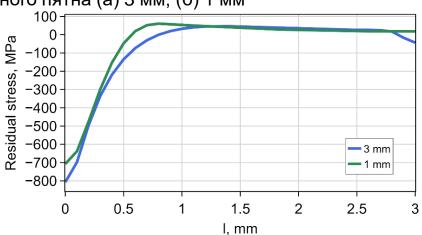


Рисунок 13 — Профили остаточных напряжений по толщине пластины, полученные при лазерной ударной проковке с интенсивностью 10 ГВт/см² и **различным размером** квадратного пятна

Исследование влияния параметров лазерной ударной проковки на результирующее поле остаточных напряжений

square pulse

2.5

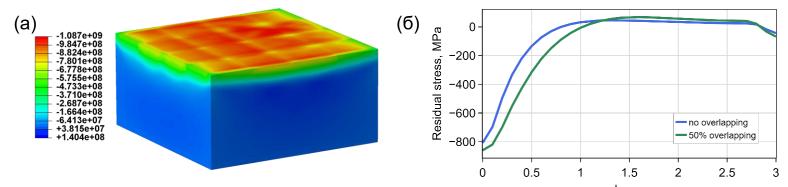


Рисунок 14— (а) Распределения остаточных напряжений ^{I, mm} части пластины, обработанной методом лазерной ударной проковкой с интенсивностью 10 ГВт/см², размером *квадратного* пятна 3 мм и перекрытием 50%; (б) сравнение профилей остаточных напряжений для данного режима проковки с перекрытием и без

 перекрытия

 (a)
 -1.122e+09 -1.004e+09 -8.850e+08 -6.479e+08 -4.127e+08 -1.73e+08 -1.73

Рисунок 15 — (a) Распределения остаточных напряжений в части пластины, обработанной методом лазерной ударной проковкой с интенсивностью 10 ГВт/см², размером *круглого* пятна 3 мм и перекрытием 50%; (б) сравнение профилей остаточных напряжений для данного режима с различной формой пятна

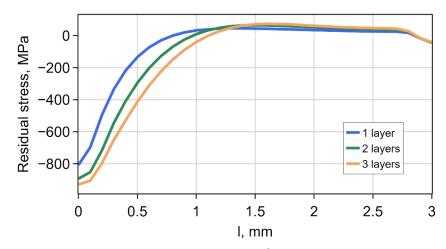


Рисунок 16 – Профили остаточных напряжений по толщине пластины, полученные при лазерной ударной проковке с интенсивностью 10 ГВт/см², размером квадратного пятна 3 мм и различным количеством проходов

Моделирование лазерной ударной проковки деталей сложной геометрии

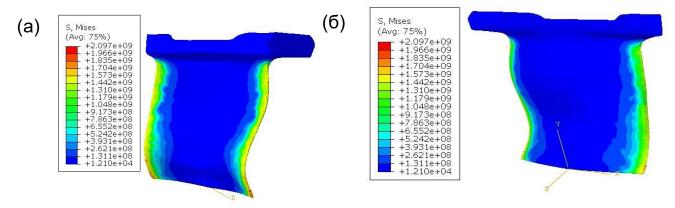


Рисунок 17 – Распределение напряжений по Мизесу по обработанной (а) и противоположной (б) стороне лопатки

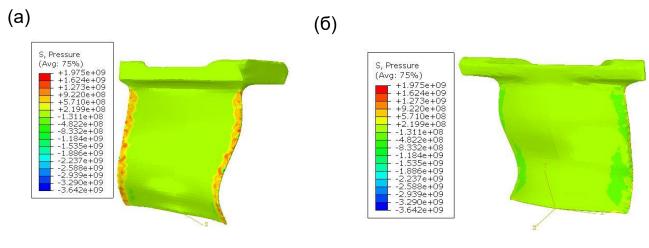


Рисунок 18 – Распределение механического давления по обработанной (а) и противоположной (б) стороне лопатки

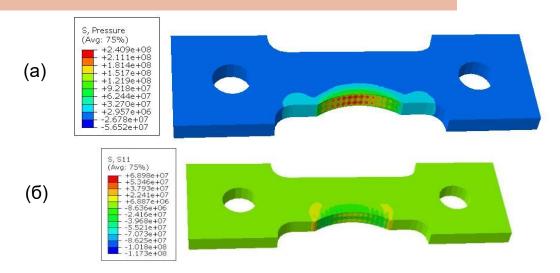


Рисунок 19 – Распределение механического давления (a) и компоненты напряжения по направлению воздействия (б) по образцу

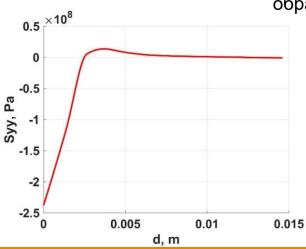


Рисунок 20 – Профиль остаточных напряжений по глубине образца для компоненты, перпендикулярной приложенной нагрузке

Заключение

На основе полученных результатов можно заключить, что применение численного моделирования процесса лазерной проковки позволит:

- Определить целесообразность лазерной ударной проковки детали до начала ее обработки.
- Снизить затраты времени и финансов на обработку деталей за счет уменьшения или полного исключения тестовых испытаний.



Спасибо за внимание!

