

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Гачеговой Елены Алексеевны**

«Влияние лазерно-индуцированных остаточных напряжений на усталостную долговечность титановых образцов с концентраторами напряжений»,

представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела

Диссертационная работа Е.А. Гачеговой посвящена проблеме повышения усталостной долговечности титановых сплавов с концентраторами напряжений методом лазерной ударной обработки (ЛУО). В работе создан экспериментальный комплекс для ЛУО в диапазоне плотностей мощности 1–90 ГВт/см<sup>2</sup>, верифицирована методика определения остаточных напряжений на глубине до 1 мм, установлены пороговые режимы (3 ГВт/см<sup>2</sup> – генерация, 10–12 ГВт/см<sup>2</sup> – оптимум, >12 ГВт/см<sup>2</sup> – насыщение). Показано, что материал защитного покрытия и пространственная локализация обработки являются определяющими факторами. Обработка торца концентратора обеспечивает 7–10-кратное увеличение ресурса, тогда как смещение зоны обработки может снижать долговечность. Работа имеет высокую теоретическую и практическую значимость для механики разрушения и авиационного материаловедения.

### Научная новизна

1. Реализован процесс ЛУО образцов произвольной геометрии в диапазоне плотностей энергии от 3 до 90 ГВт/см<sup>2</sup>. Предложены оптимальные режимы обработки, оказывающие наибольшее влияние на усталостный ресурс.
2. Реализована и верифицирована методика определения остаточных напряжений на глубинах до 1 мм на основе сравнения с методом рентгеновской дифракции.
3. Показано кратное увеличение усталостного ресурса образцов из титановых сплавов ОТ4-0, ВТ1-0 и ВТ6 с концентратором напряжений после ЛУО.

### Теоретическая и практическая значимость

1. Разработан и собран программно-аппаратный комплекс, позволяющий изучать процесс ЛУО в широком диапазоне интенсивности лазерного воздействия и проводить мелкосерийную обработку деталей сложной геометрии.
2. Сформулированы методические рекомендации применения ЛУО, обеспечивающие повышение усталостной долговечности металлических элементов конструкций с концентраторами напряжений.

3. Создана экспериментальная база данных профилей остаточных напряжений для дальнейшей верификации математической модели процесса ЛУО титановых сплавов ВТ6, ОТ4-0, ВТ1-0.
4. Подобраны защитные покрытия и режимы ЛУО, обеспечивающие кратное увеличение ресурса для образцов с концентраторами напряжений.

### Актуальность темы

Автореферат начинается с убедительной статистики: 55% отказов авиационных конструкций связано с усталостью, 16% – с коррозией, причем трещины зарождаются в концентраторах напряжений. Лазерная ударная обработка рассматривается как метод создания глубоких (до 1000 мкм) сжимающих остаточных напряжений. Однако в автореферате справедливо отмечено, что в России данная технология находится на начальной стадии развития, что делает тему исследования безусловно актуальной как для фундаментальной механики деформируемого твердого тела, так и для прикладных задач авиастроения.

По автореферату имеются следующие замечания:

1. В положении на защиту №1 (стр. 6) указано: «Плотности мощности свыше 3 ГВт/см<sup>2</sup> приводят к образованию и распространению упругопластической волны... плотности мощности свыше 12 ГВт/см<sup>2</sup> не оказывают значительного влияния». Это важный результат. Однако физически порог должен определяться не абсолютным значением плотности мощности  $I$ , а соотношением между создаваемым давлением  $P$  и динамическим пределом текучести материала  $\sigma_y^{dyn}$ . В классических работах (Fabro, 1990) давление плазмы в режиме ограниченной абляции оценивается как:

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{ZI},$$

Где  $Z$  – приведенный акустический импеданс системы «покрытие–вода–образец»,  $\alpha$  – доля энергии, идущая в плазму.

Из автореферата неясно, каковы значения  $Z$  и  $\alpha$  для использованной экспериментальной схемы. Без этого остается открытым вопрос: порог 3 ГВт/см<sup>2</sup> – это свойство титановых сплавов или конкретной конфигурации (вода +

алюминиевая фольга)? Иными словами, можно ли этот порог обобщать на другие материалы и схемы ЛУО?

2. В автореферате описано сравнение трех методов пересчета данных сверления отверстия (интегральный, дифференциальный, ASTM E837-13) с рентгеновской дифракцией. Вывод: оптимальным является метод ASTM E837-13 с кубическим распределением шагов. Однако из текста не ясно, как учитывалась **пространственная неоднородность** остаточных напряжений в направлении, параллельном поверхности. Лазерное пятно имеет конечный размер, а тензорезисторная розетка для метода сверления имеет диаметр большего порядка. При сверлении отверстия в центре розетки измеряется усредненная деформация от напряжений, распределенных по площади, сравнимой с размером пятна. Если поле напряжений существенно неоднородно (например, на краю пятна), то метод сверления может давать заниженные значения. Проводилась ли оценка погрешности, связанной с конечным размером тензорезистора?
3. В положении на защиту №4 утверждается, что ЛУО влияет преимущественно на стадию зарождения трещины. В тексте (стр. 12, раздел о микроструктуре) сказано, что ЛУО не приводит к структурным превращениям, а остаточные напряжения являются аддитивным вкладом. Однако из классической физики пластической деформации известно, что сжимающие остаточные напряжения на уровне сотен МПа (в работе достигнуто до 500 МПа) при скоростях деформации  $\dot{\epsilon} > 10^6 \text{ с}^{-1}$  обязательно сопровождаются генерацией дислокаций и, как следствие, изменением микроструктуры хотя бы на субзеренном уровне. Как согласуется утверждение об «отсутствии структурных изменений» с наличием значительных остаточных напряжений? Возможно, речь идет об отсутствии **фазовых** превращений ( $\alpha \rightarrow \beta$ ), но не об отсутствии дислокационной структуры.
4. Наиболее интересным результатом работы является демонстрация того, что даже одинаковые профили остаточных напряжений (рис. 7, стр. 13) могут приводить к противоположным эффектам: обработка на расстоянии 1,5 мм от вершины выреза снизила долговечность на 30%, а обработка вокруг концентратора увеличила ее в 2 раза. Это блестящий эксперимент, показывающий, что знак эффекта определяется не только величиной остаточных напряжений, но и их пространственным распределением

относительно концентратора. В первом случае зона сжатия окружена зоной растяжения, и трещина зарождается именно в растянутой зоне. Однако в автореферате не приведены измерения остаточных напряжений на самом расстоянии 1,5 мм от вершины – измерялись напряжения только в центре зоны обработки. Какова была величина и знак остаточных напряжений непосредственно в вершине выреза для этой схемы? Без этого объяснение остается гипотетическим.

5. В автореферате описано, что для образцов ВТ6 после ЛУО по схеме №5 была выбрана максимальная нагрузка  $F_{max}=16,5$  кН (вместо 10 кН для необработанных образцов) на основе численного моделирования, чтобы «напряжения в вершине надреза были эквивалентны». Однако из автореферата неясно, какая именно модель использовалась для расчета напряжений (линейно-упругая? упругопластическая? с учетом геометрической нелинейности?), каков критерий «эквивалентности» – равенство максимальных главных напряжений? равенство коэффициента интенсивности? равенство критерия фон Мизеса?

Вышеприведённые замечания по тексту автореферата не снижают высокой научной и практической ценности представленной диссертации.

Диссертационная работа по своей актуальности, научной новизне и практической значимости отвечает требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, **Гачегова Елена Алексеевна**, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела.

Информация о лице, составившем отзыв:

и.о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук;

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1;

тел: +7 (383) 330-42-68;

сайт: <https://itam.nsc.ru/>;

почта: [kraus@itam.nsc.ru](mailto:kraus@itam.nsc.ru);

