



УДК 621.373.826

**О ВОЗДЕЙСТВИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА КОМПОЗИЦИОННОЕ ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ**

д.т.н., проф. И.М. Приходько, В.А. Дуреев, А.Л. Винник

Рассматривается воздействие непрерывного лазерного излучения на композиционное теплозащитное покрытие: поглощение излучения, модель теплового источника, распространение теплоты, а также стадии и механизм разрушения композиционного теплозащитного покрытия.

Стратегическим направлением в разработке перспективных видов вооружения, действующих на новых физических принципах, в 70-80-е годы являлось создание лазерного оружия, способного разрушать элементы несущих конструкций вооружения и боевой техники или же ухудшать физико-механические свойства материалов настолько, чтобы вывести объект из строя [1].

При лазерном воздействии основную роль играют энергетические характеристики излучения, среди которых наиболее важными являются: энергия излучения ( $W$ , Дж); мощность излучения ( $P$ , Вт); плотность энергии ( $Q$ , Дж/м<sup>2</sup>); плотность потока мощности ( $J$ , Вт/м<sup>2</sup>) [3].

Специфичность параметров лазерного излучения (спектральная яркость, монохроматичность, когерентность и др.) обуславливают целый ряд особенностей, характерных лишь для лазерного воздействия на композиционные теплозащитные покрытия (КТЗП). Например, характерная для лазерного излучения монохроматичность обуславливает более резкую зависимость коэффициента поглощения (как в материале мишени, так и в его парах) от температуры поверхности и длины волны излучения. Поэтому при лазерном воздействии существенной является экрани-

ровка поверхности парами вещества или плазменным облаком, возникающим вблизи мишени.

Сложность химического состава КТЗП обуславливает особенность их разрушения вследствие большого числа фазовых и полиморфных превращений, химических реакций, протекающих как на поверхности, так и в глубинных слоях прогретого покрытия. Их суммарный тепловой эффект определяет удельную энтальпию разрушения материала. В связи с тем, что лазерное излучение (ЛИ) воздействует на КТЗП как на непрозрачный материал, рассеивание и преломление излучения можно не учитывать. Определяющими энергетическую эффективность процесса следует считать поглощение и отражение ЛИ, оказываемое средой. Описание этих процессов дается в [3].

Распространение тепла в материале при воздействии на него непрерывного ЛИ описано в [4]. Следует отметить, что при воздействии на КТЗП непрерывным лазером, для точного нахождения распределения температуры не следует пренебрегать потерями теплоты за счет радиации и конвекции. При длительном поглощении теплоты нагретая площадь увеличивается и тепловые потери соответственно растут. Большая часть энергии поглощается в скин-слое, толщина  $d$  которого для КТЗП равна  $10^{-3} \div 10^{-1}$  см. Это приводит к тому, что тепловое разрушение КТЗП носит квазиобъемный характер. Так как для КТЗП глубина  $d$  проникновения ЛИ в материал значительно меньше толщины  $h$  прогретого слоя ( $d \ll h$ ), то можно полагать, что тепловыделение носит поверхностный характер [3] и имеет место распределенный поверхностный источник теплоты [2]. При этом размер зоны  $r_0$  энерговыделения значительно больше толщины прогретого слоя, т.е.  $r_0 \gg h$ . Поэтому перенос тепла можно считать одномерным.

При попадании ЛИ на КТЗП сначала начинается процесс дегидратации – выделение адсорбционной влаги. Затем происходит термическая деструкция связующего. Дальнейший прогрев ведет к пиролизу связующего и сопровождается большим выделением газов, которые при невысоких темпах нагрева выходят наружу через поры и трещины, способствуя охлаждению каркаса-наполнителя. Когда достигается температура плавления, вследствие появления пленки расплава, передача тепла в более глубокие слои замедляется. В случае дальнейшего роста температуры наступает режим испарения жидких и твердых продуктов разрушения.

Если интенсивность излучения  $J_0$  находится в пределах

$$J_0^* \leq J_0 < J_0^i,$$

где  $J_0^*$  - критическое значение интенсивности, при которой потерями энергии на теплопроводность можно пренебречь, полагая, что

вся поглощенная энергия тратится на нагрев и испарение поверхностного слоя тела;

$J_0^i$  – пороговое значение интенсивности, при которой в парах образуется плазма, экранирующая поверхность мишени от подводимой лазером энергии,

то наступает режим форсированного испарения (сублимации). При этом вся поглощенная энергия ЛИ тратится на нагрев и испарение поверхностного слоя материала при практически неизменной температуре всего тела и незначительной толщине расплава на его поверхности [3]. Пары вещества в режиме форсированного испарения остаются прозрачными для лазерного излучения. Температура паров равна температуре поверхностного слоя тела и пропорциональна интенсивности ЛИ.

Если интенсивности излучения свыше  $10^9 \div 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, то тепловые механизмы разрушения КТЗП сменяются другими, связанными с образованием светодетонационной ударной волны, поражающим фактором которой является механический импульс. Тепловые напряжения, возникающие при нагреве КТЗП, также могут играть существенную роль в разрушении материала. При таких интенсивностях нагрева избыточное давление газа взламывает структуру материала и обломки каркаса выносятся наружу, дополнительно разрушая материал.

Таким образом, в статье рассмотрены особенности лазерного воздействия на композиционные теплозащитные покрытия: поглощение излучения, модель теплового источника, распространение теплоты, а также стадии и механизм лазерного разрушения КТЗП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белов В., Савинов В. Лазерное оружие // Техника и вооружение. – 1990. – № 1. – С. 8 - 9.
2. Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная обработка неметаллических материалов. – М.: Высш. шк., 1988. – 190 с.
3. Устенко Э. П. Основы квантовой электроники. Ч. 3. Действие лазерного излучения на вещество: Конспект лекций. – Харьков, 1979. – 132 с.
4. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. – М.: Мир, 1974. – 450 с.

*Поступила в редколлегию 25.09.2000*