

## ЛАЗЕРНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ МАГНИТОВ РЕЛЕ

Одним из направлений повышения эффективности разделения магнитных заготовок реле является замена сквозной, обычно, механической, электрохимической или электроэрозионной резки заготовки на ее скрайбирование (надрезание) с последующей ломкой заготовки по линиям скрайбирования. Высокопроизводительным инструментом для скрайбирования металлов может служить лазерный пучок, технические и технологические преимущества которого достаточно хорошо известны и эффективно реализуются в различных отраслях промышленности, например, при разделении диэлектриков и полупроводников.

В данной работе анализируется возможность применения лазеров для скрайбирования металлов, рассмотрена методика подбора для этой цели оптимальных параметров излучения, приведены результаты разработанного и внедренного авторами в производство реле нового способа лазерного разделения магнитных заготовок на магниты мерной длины.

Результаты опробования лазерного скрайбирования для разделения заготовок из различных металлов и сплавов показали, что оптимальное отношение глубины надреза к толщине металлической пластины 20-40%, а для хрупких заготовок, например, магнитотвердых сплавов это соотношение может быть в несколько раз меньше. При этом оказывается, что наиболее легко и стабильно разламывание заготовок происходит если надрезы выполнены с обеих сторон пластины, а образование канавки вызвано только испарением металла, т.е. когда возникновение и движение жидкой фазы металла сведено к минимуму.

Максимально допустимая длительность лазерного импульса  $\tau_{\max}$  при которой не наблюдается оплавление боковых стенок и дна канавки может быть найдена из известного условия несущественности бокового теплоотвода:

$$\tau_{\max} \approx 0,1 r_0^2 / a, \quad (I)$$

где  $r_0$  - радиус пятна облучения на поверхности металла;  $a$  - коэффициент температуропроводности материала заготовки.

Глубину скрайбирования  $h_1$  за один импульс облучения в режиме оптимального квазистационарного испарения можно рассчитать по фор-

муле

$$h_1 = \sqrt{a\tau} \quad (\tau \leq \tau_{\max}) \quad (2)$$

Для оценки и выбора энергетических параметров пучка лазерного скрайбера можно воспользоваться уравнением, связывающим остановившуюся скорость фронта испарения

$$v_H = q/Q_L, \quad (3)$$

где  $q$  - плотность падающего на металл потока излучения;  $Q$  - плотность вещества;  $L$  - удельная теплота испарения, а также управлением

$$v_H = \sqrt{q/a}, \quad (4)$$

где  $v_H$  - скорость распространения в материале волны нагрева.

В этом случае условием оптимального для скрайбирования металлов квазистационарного испарения является равенство уравнений (3) и (4), т.е.

$$v_H = v_H = q/Q_L = \sqrt{q/a}$$

Откуда следует, что

$$q = Q_L \sqrt{a/q} \quad (5)$$

Графическая взаимосвязь энергетических и временных параметров лазерного пучка, обеспечивающих оптимальное условие скрайбирования различных металлов, приведена на рис.1, где очевидно, что кривыми 1 и 3 ограничена практическая область требуемых для скрайбирования параметров лазерного излучения.

Выбор на графике временного интервала  $10^{-8}$ - $10^{-5}$  с обусловлен тем, что минимальная длительность импульса  $10^{-8}$  с ограничена техническими возможностями современных импульсных лазеров, а величина  $\tau_{\max} = 10^{-5}$  с оценена по формуле (1) (в расчете принято  $a=0,1$  см<sup>2</sup>/с,  $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  см).

Суммарную глубину надреза  $h$  при многоимпульсном облучении и перемещении заготовки относительно пучка лазера со скоростью  $v$  можно оценить по формуле

$$h = \frac{2FL_0}{v} \cdot h_1, \quad (6)$$

где  $F$  - частота повторения импульсов.

Используя энергетическо-временные характеристики лазеров импульсного действия и зависимости на рис.1, можно выбрать требуемые для скрайбирования металлов типы лазеров и их режимы работы. Так, например, для получения надрезов глубиной до 0,3-0,4 мм могут быть использованы отечественные лазеры ЛТИ-501, ЛТИ-701 и ЛТИ-502 при диаметре пятна облучения заготовки не более  $10^{-2}$  см. Лазеры ЛТИ-501

и ЛТИ-701 должны работать с частотой повторения импульсов  $F \leq 5-10$  кГц, а лазер ЛТИ-502 - с частотой  $F \leq 15-20$  кГц. Для скрайбирования металлов можно рекомендовать также и менее производительные лазеры типа ЛТИ-3, ЛТИ-5, ЛТИ-205, имеющие высокую импульсную мощность, но малую длительность ( $\sim 10$  нс) и частоту повторения ( $\leq 100$  Гц) импульсов.

Приведенная методика выбора параметров режима лазерного скрайбирования металлов использовалась авторами для расчета параметров режима технологического процесса разделения заготовок из магнитотвердого сплава 25Х15КА (система  $Ni-Co-Fe$ ) в виде прутков сечением  $3 \times 3$  и  $5 \times 9$  мм, а также из сплава КНДК35Т5БА (система  $Al-Ni-Co-Ti-Cu-Fe$ ) в виде пластин размером  $30 \times 30 \times 1,4$  мм.

Для исследования режимов скрайбирования и реализации новой технологии в производстве была разработана специальная установка ЯЛ2.899.000, содержащая серийный лазер ЛТИ-502, систему формирования пучка СОК-1, предметный стол со специальными коссетами для укладки и перемещении магнитных заготовок со скоростью до  $30$  мм/с. Были определены следующие параметры лазерного пучка, обеспечивающие удовлетворительное качество разламывания заготовок и максимальную производительность скрайбирования (рис.2):  $F = 4,5$  кГц, что обуславливало длительность импульса  $\tau \approx 100$  нс;  $r_0 = 40$  мкм. Регулятор мощности излучения лазера устанавливался при этом в оптимальное положение, обеспечивающее при скорости скрайбирования  $v = 10-11$  мм/с глубину надреза  $h \approx 120-150$  мкм без аморфизации приповерхностного слоя металла и без оплавления дна и краев лунки.

В настоящее время технология лазерного скрайбирования магнитных заготовок внедрена в производство четырех типов реле. Для изготовления около  $3$  млн. магнитов в год используются  $2$  установки ЯЛ2.899.000, что позволило выработать  $30$  электрорезонансных станков и высококвалифицированных операторов. Кроме того, ежегодно экономится около  $20\%$  дефицитного кобальтосодержащего сплава и более  $100000$  кВт.час электроэнергии. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения технологии лазерного скрайбирования магнитов реле составил на предприятии более  $100,0$  тыс.руб.

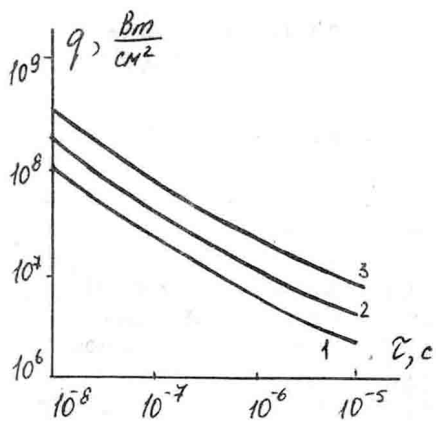


Рис.1

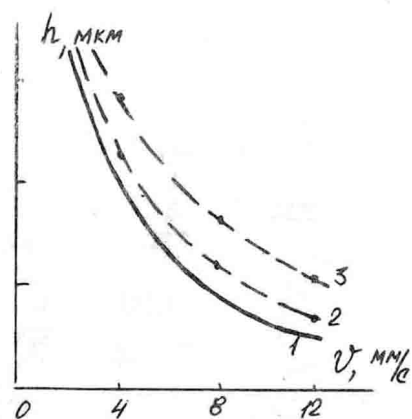


Рис.2

Рис.1 Зависимость плотности потока лазерного излучения от длительности импульса:  
 1 - титан; 2 - сталь;  
 3 - медь

Рис.2 Зависимость суммарной глубины скрайбирования от скорости перемещения заготовки:  
 1 - расчет для  $a=0,2 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  
 $\tau=10^{-7} \text{ с}$ ,  $r_0=40 \text{ мкм}$ ,  
 $F=4,5 \text{ кГц}$ ; 2 - эксперимент для  $q=0,7 \cdot q_{\text{опт}}$ ; 3 - эксперимент для  $q=q_{\text{опт}}$