

Физика твёрдого тела

УДК 539.4.016.:621.785:621.18.068.4

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЕЙНЫХ БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Д. М. Гуреев

Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mail: physics@samgtu.ru

На примере ножей гильотинных ножниц изучены физические и технологические особенности лазерной термообработки рабочих поверхностей линейных большемерных изделий с целью повышения их износостойкости.

Ключевые слова: *лазерная термообработка, полосовой тепловой источник, температурный профиль, структурно-фазовый состав, остаточные напряжения.*

Введение. Практическая реализация результатов физических исследований влияния лазерного воздействия на характер протекания фазовых превращений и изменение структурно-напряжённого состояния поверхностей материалов предполагает решение целого ряда дополнительных задач, связанных, в частности, с анализом особенностей процессов износа рабочих поверхностей изготовленных из них изделий; требований, предъявляемых к технологическому состоянию поверхностей, предназначенных для обработки лазерным излучением; влияния геометрии и габаритов изделий в целом и месторасположения и размеров обрабатываемых участков в частности на выбор параметров лазерной обработки и т.п. В данной работе эти задачи рассмотрены в контексте разработки технологии лазерной термообработки рабочих поверхностей линейных большемерных изделий типа ножей гильотинных ножниц.

Материал и методика эксперимента. В исследованиях использовались ножи гильотинных ножниц, изготовленные из низколегированной хромокремнистой инструментальной стали 9ХС и прошедшие стандартную объемную термообработку на формирование в них исходной мартенситной структуры. Лазерная термообработка их режущих кромок осуществлялась излучением непрерывного СО₂-лазера мощностью 650 Вт, сфокусированного с помощью специально разработанного оптического устройства, состоящего из цилиндрической линзы и двух клиньев, в полосу размером 11×1 мм [1]. Использованное оптическое устройство обеспечивало равномерность распределения плотности мощности лазерного излучения вдоль полосы фокусировки и её гауссовый профиль в поперечном направлении.

Дмитрий Михайлович Гуреев (д.ф.-м.н., проф.), профессор, каф. общей физики и физики нефтегазового производства.

Для исследования зон лазерного воздействия использовались методы оптической микроскопии, металлографии, микродюрометрии, рентгенофазового анализа. Остаточные напряжения определялись рентгеновским методом $\text{Sin}^2\psi$ по четырем углам $\psi = 0, 10^\circ, 20^\circ$ и 30° в диапазоне углов $2\theta = 140 \div 170^\circ$.

Результаты и их обсуждение. Предварительный анализ условий работы ножей гильотинных ножниц показал, что в процессе своей эксплуатации при холодном деформировании листового металла они подвергаются ударно-абразивному и ударно-усталостному видам изнашивания. Ударно-абразивное изнашивание происходит при ударе по твердым частицам, образующимся в результате охрупчивания режущих кромок при наклепе. В основе ударно-усталостного изнашивания лежит многократная деформация поверхностного слоя, ведущая к постепенному возрастанию его наклепа, все большему охрупчиванию и последующему отделению частиц износа. Выкрашивание режущих кромок ножей предвещает зарождение и развитие усталостных трещин, усугубляющееся наличием на исходных шлифованных поверхностях сетки микротрещин с ярко выраженной ориентацией относительно направления шлифовки. В соответствии с этим перед началом эксплуатации рабочие поверхности ножей не должны содержать микротрещины. Это требование является общим для всех технологических операций придания ножам необходимых эксплуатационных характеристик, в том числе и для лазерной термообработки поверхностей, предопределяя использование кратного лазерного воздействия [1].

Исходная микроструктура ножей после их объемной термообработки в поверхностном слое состоит в основном из мартенсита отпуска с мелкими, равномерно расположенными карбидами M_3C и игольчатыми выделениями бейнита по границам зерен. Ниже в микроструктуре появляются трооститные пятна, количество и размер которых возрастают с приближением к сердцевине.

При лазерной закалке исходной микроструктуры в поверхностном слое формируются крупноигольчатый мартенсит и остаточный аустенит. По мере удаления от поверхности наблюдается переход к мелкоигольчатому мартенситу, остаточному аустениту и дисперсным карбидам M_3C . Ниже микроструктура характеризуется появлением дисперсных выделений, по своему строению близких к бейниту. Постепенно бейнит становится преобладающей структурной составляющей. Под зоной лазерной закалки формируется зона лазерного отпуска, микроструктура которой состоит в основном из троостита отпуска и карбидов M_3C .

При двукратной лазерной обработке, включающей в себя предварительный лазерный отпуск исходной микроструктуры и последующую лазерную закалку сформированной микроструктуры лазерного отпуска, вблизи поверхности сразу формируется более дисперсная микроструктура, состоящая из мелкоигольчатого мартенсита, остаточного аустенита и дисперсных карбидов M_3C . При этом регистрируется меньшее количество остаточного аустенита, чем в зоне лазерной закалки исходной микроструктуры.

Сопоставление формирующихся микроструктур и соответствующих им распределений микротвёрдости (рис. 1) и остаточных напряжений (рис. 2) в зонах лазерного воздействия указывает на преимущества использования кратного лазерного воздействия, сочетающего лазерную закалку с предвари-

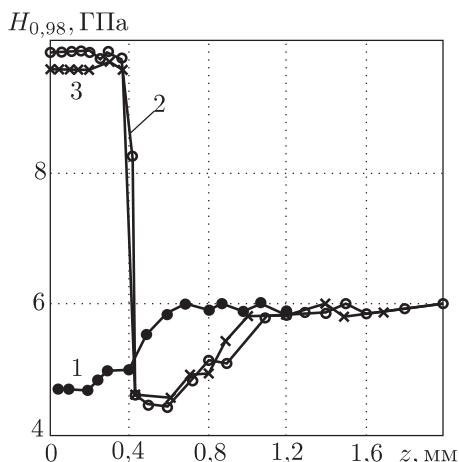


Рис. 1. Распределение микротвёрдости $H_{0,98}$ по глубине z зон лазерного отпуска — $v = 7,0$ мм/с (1), лазерной закалки — $v = 2,6$ мм/с (2) и лазерной закалки — $v = 2,6$ мм/с с предварительным лазерным отпуском — $v = 7,0$ мм/с (3) исходной мартенситной структуры стали 9ХС: $q = 6,5 \times 10^3$ Вт/см²

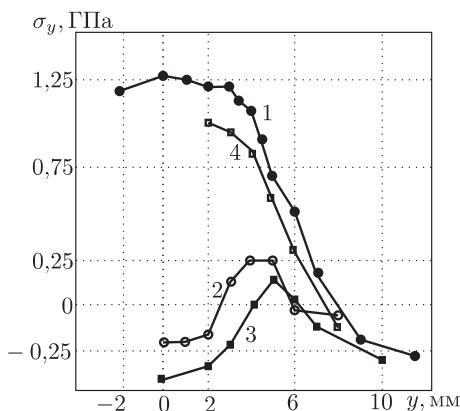


Рис. 2. Распределение поперечных остаточных напряжений σ_y по поверхности зоны лазерного отпуска исходной мартенситной структуры стали 9ХС — $v = 7,0$ мм/с (1), зоны её последующей лазерной закалки — $v = 2,6$ мм/с (2), зоны лазерной закалки исходной структуры — $v = 2,6$ мм/с (3) и зоны её последующего лазерного отпуска — $v = 7,0$ мм/с (4): $q = 6,5 \cdot 10^3$ Вт/см²

тельным лазерным отпуском, в технологии лазерной термообработки рабочих поверхностей изделий, в частности таких, как ножи гильотинных ножниц.

Для расчета температурных полей, формирующихся вблизи режущей кромки ножа, решалась задача нагрева его поверхности лазерным источником тепла, движущимся с постоянной скоростью v . При этом в приближении полубесконечного тела, характеризующегося постоянными коэффициентами температуропроводности a , теплопроводности λ , отражения лазерного излучения поверхностью R и имеющего в начальный момент времени постоянную по всему полупространству практически нулевую температуру ($T_0 = 20$ °C), решение уравнения теплопроводности записывается в виде [1]

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \frac{2(1-R)a}{\lambda} \int_0^t dt' \int_{-\infty}^{+\infty} dx' \int_{-\infty}^{+\infty} dy' q(x', y') \times \exp \left[-\frac{(x-x'-vt')^2 + (y-y')^2 + z^2}{4a(t-t')} \right] \frac{1}{[4\pi a(t-t')]^{3/2}}. \quad (1)$$

Здесь (x, y, z) — точка наблюдения; $0, x', y', z'$ — движущаяся со скоростью v вдоль оси $0x$ система координат, жёстко связанная с источником; $q(x', y')$ — плотность мощности поверхностного источника тепла в точке (x', y') (функция источника), которая с точностью временной стабильности лазера постоянна во времени и связана с интегральной мощностью лазерного излучения соотношением

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} dx' \int_{-\infty}^{+\infty} dy' q(x', y').$$

При расчёте температурных полей вблизи режущей кромки ножа необходимо учитывать тепловое влияние края, задаваемого, в частности, введением

фиктивного теплового источника, симметричного относительно края реальному тепловому источнику. Для использованного нами полосового источника функция источника в данном случае записывается в виде

$$q(x', y') = q_0 \exp\left(-\frac{x'^2}{4a\tau}\right) [\theta(y' - b) - \theta(y' - b - l) - \theta(y' + b) + \theta(y' + b + l)], \quad (2)$$

где θ — ступенчатая функция Хевисайда, l — длина полосы, b — расстояние от края теплового источника до режущей кромки ножа, τ — параметр, связанный с коэффициентом сосредоточенности k источника в поперечном направлении соотношением

$$\tau = \frac{1}{4ak}.$$

Подставляя (2) в (1), получаем следующее выражение для температурного профиля:

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \frac{P(1-R)}{\pi\lambda l} \int_0^t dt' \exp\left[-\frac{(x-vt')^2}{4a(t-t'+\tau)}\right] \exp\left[-\frac{z^2}{4a(t-t')}\right] \times \\ \times \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{y-b}{2\sqrt{a(t-t')}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y-b-l}{2\sqrt{a(t-t')}}\right] - \right. \\ \left. - \operatorname{erf}\left[\frac{y+b}{2\sqrt{a(t-t')}}\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{y+b+l}{2\sqrt{a(t-t')}}\right] \right\} \frac{1}{\sqrt{(t-t')(t-t'+\tau)}}, \quad (3)$$

где

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-x^2) dx$$

— функция ошибок Гаусса. Из выражения (3) определяется оптимальное расстояние b , при котором, с одной стороны, не происходит оплавление режущей кромки ножа, а с другой — формируется максимальная глубина зоны лазерной закалки. На основании выполненных расчетов можно сделать вывод, что лазерную термообработку полосовым источником следует проводить при $b \approx 0$. В условиях реального производства лазерную термообработку удобнее реализовывать даже с небольшим ($\delta \sim 1$ мм) заходом излучения за режущую кромку ножа, поскольку при этом при незначительной потере плотности мощности излучения ($\sim \delta/l$) обеспечивается хороший визуальный контроль за ходом лазерной термообработки.

Особого внимания требует обеспечение параллельности в перемещении лазерного луча относительно режущей кромки ножа. Нарушение требования параллельности может привести к нежелательным последствиям, например, к отпуску режущей кромки и, как следствие этого, к уменьшению износостойкости ножа. На основании выполненных расчетов можно считать допустимым отклонение от параллельности в 1 мм на 2 м длины при одномиллиметровом первоначальном заходе лазерного излучения за край режущей кромки ножа.

Последовательная реализация лазерной термообработки полосовым тепловым источником сначала задней, а затем передней рабочей поверхности

режущей кромки ножа ведет к нежелательному усиленному развитию отпусковых процессов в ее окрестности. Это предопределяет очевидный выбор лишь передней рабочей поверхности режущей кромки ножа для ее лазерной термообработки полосовым тепловым источником.

Анализ структурно-фазового состава и напряженного состояния поверхности, формирующихся непосредственно вблизи режущей кромки ножа при лазерной термообработке, позволяет выявить влияние эффектов рассеяния тепла и его накопления в начале и в конце процесса соответственно и скорректировать параметры лазерного воздействия. Полученные распределения твердости по Виккерсу, содержания остаточного аустенита, величины и знака остаточных напряжений вдоль передней рабочей поверхности режущей кромки ножа, подвергнутой двукратной лазерной термообработке в последовательности «лазерный отпуск — лазерная закалка» при фиксированных скоростях перемещения полосового теплового источника 7,0 и 2,6 мм/с соответственно позволили сделать вывод о практической целесообразности проведения лазерной закалки с равномерно нарастающей скоростью перемещения полосового теплового источника от 2,0 мм/с в начале процесса до 3,7 мм/с в его конце при фиксированной мощности лазерного излучения 650 Вт для обеспечения равномерности в распределении этих характеристик, определяющих износостойкость ножа, вдоль его режущей кромки. Достигнутые при этом значения твердости по Виккерсу составили 940–980 НВ, содержания остаточного аустенита — 25–30 %, остаточных напряжений сжатия — 0,47–0,53 ГПа.

Выводы. Таким образом, практическая реализация лазерной термообработки режущих кромок ножей гильотинных ножниц, опирающаяся на выводы теоретического рассмотрения теплофизических аспектов процесса и их экспериментального подтверждения с анализом формирующихся структурно-фазового состава и напряженного состояния поверхности, предполагает использование полосового теплового источника и двукратного лазерного воздействия в последовательности «лазерный отпуск — лазерная закалка» с равномерно нарастающей скоростью перемещения луча по обрабатываемой поверхности при фиксированной мощности лазерного излучения. Допустимо отклонение от параллельности в отношении направлений перемещения полосового теплового источника и режущей кромки ножа в 1 мм на 2 м длины при первоначальном одномиллиметровом заходе сфокусированного лазерного излучения за край режущей кромки. Лазерной термообработке подвергаются лишь передние рабочие поверхности режущих кромок ножей.

Производственные испытания ножей гильотинных ножниц после их лазерной термообработки по предложенной выше схеме показали стабильное повышение износостойкости при раскрое тонколистовых материалов до 2,5 раз.

Развитые подходы к реализации процесса лазерной термообработки режущих кромок ножей гильотинных ножниц носят общий характер и могут быть распространены на другие линейные большегабаритные изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Д. М. Гуреев, Лазерная и лазерно-ультразвуковая обработка материалов. Самара: СамГТУ, 2011. 244 с. [D. M. Gureev, Laser and laser ultrasonic machining of materials. Samara: Samara State Technical Univ., 2011. 244 pp.]

Поступила в редакцию 04/ХП/2012;
в окончательном варианте — 01/IV/2013.

MSC: 82D35

**PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF LASER HEAT
TREATMENT OF WORKING SURFACES OF LINEAR LARGE SIZED
PRODUCTS**

D. M. Gureev

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia.

E-mail: physics@samgtu.ru

Physical and technological peculiarities of a laser heat-treatment of working surfaces of linear large sized products were studied on the example of a guillotine shears knives for the purpose of its wear-resistance increase.

Key words: *laser heat-treatment, striped heat source, temperature profile, structural-and-phase composition, residual stresses.*

Original article submitted 04/XII/2012;
revision submitted 01/IV/2013.

Dmitriy M. Gureev (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Professor, Dept. of General Physics and Physics of Oil and Gas Production.